



**António Filipe  
Gonçalves Diogo**

**Emulsões Betuminosas Aplicadas na Colagem de  
Camadas de Pavimentos Rodoviários**





**António Filipe  
Gonçalves Diogo**

**Emulsões Betuminosas Aplicadas na Colagem de  
Camadas de Pavimentos Rodoviários**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento de requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor, Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, professor auxiliar, Universidade de Aveiro



## **o júri**

presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa,  
Professora Associada, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina,  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Professor Doutor, Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta,  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Gostaria de deixar o meu profundo e sincero agradecimento a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À Engenheira Maria Carlos e ao Técnico Vítor Rodrigues, do laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela sua ajuda fundamental na realização dos trabalhos de laboratório e pelo bom ambiente profissional e pessoal proporcionado.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos que deram-me força durante a realização desta dissertação. Gostava de deixar o meu especial agradecimento ao Eurico Correia, Samuel Carvalho, José Silva, Guilherme Ascensão, Ana Lourenço, Cátia Alves e por fim à Catarina Sepúlveda, que sem a sua ajuda seria muito mais difícil de concretizar esta dissertação. Gostaria de deixar um agradecimento especial ao Vítor Noite pela sua ajuda.

Por último, aos meus pais, Dionísio e Noélia, e às minhas irmãs, Carolina e Sofia, pelo seu incentivo, compreensão, apoio, força e carinho incondicional, não deixando que, em momento algum, alguma coisa me faltasse e demonstrando sempre um orgulho imenso em mim. Este momento é dedicado a vocês.





**Palavras-chave**

Betume, Rega de colagem, Emulsão Betuminosa, Estradas, Ensaios de corte direto, Pavimentos, Ligação entre camadas.

**Resumo**

As infraestruturas de transporte têm uma elevada importância para o desenvolvimento interno de um país, reduzindo distâncias e aumentando a mobilidade, daí ser fundamental o desenvolvimento e estudo de novos métodos de construção e reabilitação.

Esta dissertação tem como base o estudo da resistência de ligação uma emulsão betuminosa usada como rega de colagem em pavimentos rodoviários,

O estudo englobou ensaios laboratoriais com três quantidades diferentes de emulsão betuminosa, quatro pressões verticais distintas, dois tipos de superfície de contacto e uma pesquisa bibliográfica. Para a execução dos ensaios de corte foi utilizada uma máquina de corte direto.

Os resultados obtidos permitiram ter um conhecimento mais aprofundado da quantidade de emulsão betuminosa a ser utilizada, para conseguir uma maior força de ligação entre camadas consoante o tipo de superfície de aplicação e carga vertical aplicada.



**keywords**

Bitumen, Tack Coat, Bitumen emulsions, Roads, Direct Shear Test, Pavements, Bond between layers.

**abstract**

Nowadays it is essential to develop and create new methods of construction and rehabilitation as the transports infrastructures have a huge importance for the country internal development by reducing distances and increasing mobility.

This dissertation is based on the study of shear strength for tack coat using a cationic bituminous emulsion fast break.

The study includes laboratory tests with three different amounts of bitumen emulsion, four distinct vertical stresses, two types of contact surface and a literature research. The tests required the use of a direct-cutting machine.

The results obtained allowed me to understand the amount of bitumen emulsion needed to achieve a greater bonding strength between layers depending on the type of surface and the vertical load applied



## *Índices*

---



## Índice

Índice.....	XV
Índice de Figuras .....	XVII
Índice de Quadros .....	XXI
Símbolos e Abreviaturas .....	XXIII
1.Introdução .....	3
1.1.Enquadramento .....	3
1.2.Objetivo.....	5
1.3.Estrutura da dissertação .....	6
2.Pavimentos Rodoviários e Misturas Betuminosas .....	9
2.1.Enquadramento .....	9
2.2.Tipos de Pavimentos .....	12
2.3.Constituição das misturas betuminosas .....	13
2.3.1.Ligante Betuminoso .....	13
2.3.2.Agregados.....	17
2.3.3.Fíler.....	21
3.Regua de Colagem em Pavimentos Rodoviários .....	25
3.1.Enquadramento .....	25
3.2.Ligação entre camadas betuminosas .....	26
3.3.Seleção da Regua de colagem (Emulsões Betuminosas).....	32
3.3.1.Emulsões Betuminosas.....	33
3.3.2.Rotura de uma emulsão betuminosa.....	36
3.3.3.Classificação das emulsões betuminosas .....	38
3.4.Condicionantes da aplicação.....	40
4.Procedimento Experimental .....	49
4.1.Enquadramento .....	49
4.2.Preparação e formulação das misturas.....	51
4.3.Determinação da baridade aparente .....	58
4.4.Ensaio Marshall .....	59
4.5.Baridade máxima .....	60

4.6.Resistência da ligação .....	63
4.7.Especificações técnicas .....	71
5.Apresentação e Discussão dos Resultados .....	75
5.1.Enquadramento .....	75
5.2. Resultados .....	77
5.2.1.Mistura MB5%.....	77
5.2.2.Mistura MB5,5%.....	80
5.3.Discussão dos esultados.....	84
6.Considerações Finais.....	91
6.1.Desenvolvimentos futuros .....	92
Referências Bibliográficas .....	97
Anexo A .....	103
Anexo B .....	111
Anexo C .....	131



## Índice de Figuras

Figura 1.1- Distribuição das forças entre camadas num pavimento em serviço. (Mohammad, et al., 2012) .....	4
Figura 2.1- Diagrama esquemático de um Pavimento Rodoviário (INIR, 2009).....	9
Figura 2.2-Exemplo esquemático de uma central descontínua (Branco, et al., 2008) .....	12
Figura 2.3-Representação esquemática da destilação do petróleo (adaptado Lombardi, 1993).....	14
Figura 2.4-Representação esquemática da composição química dos Asfaltenos e Maltenos (Silva, 2005) .....	15
Figura 2.5-Classificação do betume de pavimentação (Fonte Branco, et al., 2008) .....	16
Figura 2.6- Características importantes do material granular (Branco, et al., 2008).....	18
Figura 2.7- Material para determinar os índices de lamelação (a) e alongamento (b) (Fonte de Branco, et al., 2008).....	18
Figura 2.8-Mapa de Portugal Continental com a identificação do tipo de agregado explorado na conceção dos pavimentos rodoviários (Branco, et al., 2009) .....	19
Figura 2.9-Diagrama dos agregados naturais .....	20
Figura 2.10-Exemplo da curva granulométrica para três agregados diferentes. (Branco, et al., 2008) .....	21
Figura 3.1-Comparação entre dois espécimes, Esquerda: pequenos/grandes, Direita: grandes/pequenos (Raab, et al., 2011).....	27
Figura 3.2-Exemplo de testes que poderão ser realizados para verificar a resistência da rega de colagem (Fonte Raposeiras, et al., 2013).....	31
Figura 3.3-Esquema de uma emulsão betuminosa (NUNES, 2008) .....	33
Figura 3.4-Exemplo da adição de um emulsionante (Fonte <a href="http://dkcorporation.tradeindia.com/emulsifier-for-paints-solvents-vegetable-oil-412944.html">http://dkcorporation.tradeindia.com/emulsifier-for-paints-solvents-vegetable-oil-412944.html</a> ) .....	34
Figura 3.5-Representação esquemática de um moinho coloidal para a produção de emulsões betuminosas. (Fonte Bernucci, et al., 2008) .....	35
Figura 3.6-Central de fabrico de emulsões betuminosas (Fonte de Kett, 1998) .....	36
Figura 3.7-Processo de Rotura de uma emulsão betuminosa (Fonte Read , et al., 2003) ...	37
Figura 3.8-Designação de uma emulsão betuminosa na versão CETO_1998 (Fonte Division of Construction California Department of Transportation, 2009) .....	40
Figura 3.9-Efeito da quantidade de emulsão na resistência ao corte,.....	41
Figura 3.10-Efeito da temperatura em diferentes taxas de aplicação. ....	42
Figura 3.11-Efeito da temperatura na resistência de uma emulsão Betuminosa catiónica de rotura rápida (Fonte Chen, et al., 2010.).....	42

Figura 3.12-a) Má uniformização da rega de colagem b) Boa uniformização da rega de colagem (Mohammad, et al., 2012).....	43
Figura 3.13-Camião cisterna usado para aplicação da rega de colagem (Mohammad, et al., 2012).....	44
Figura 3.14-Correto posicionamento dos borrifadores colocados nos caminhões cisternas. (Fonte Division of Construction California Department of Transportation, 2009).....	44
Figura 3.15-Efeito do tempo de cura na resistência ao corte. (adaptado de Chen, et al., 2010).....	45
Figura 4.1-Diagrama de procedimentos para o fabrico das misturas .....	49
Figura 4.2-Diagrama resumido do procedimento experimental à resistência de ligação entre camadas. ....	50
Figura 4.3-Curva Granulométrica para as misturas MB5% e MB5,5% de betume .....	52
Figura 4.4-Agregados a secar na estufa a uma temperatura de 110 °C .....	54
Figura 4.5-Misturadora mecânica usada na mistura dos agregados com o ligante betuminoso .....	55
Figura 4.6-Moldes (102 mm e 64 mm) utilizados para compactar a mistura betuminosa. .	56
Figura 4.7-Compactador mecânico utilizado para compactar a mistura betuminosa nos moldes.....	57
Figura 4.8-Banho-maria (a) e macaco hidráulico (b) .....	57
Figura 4.9-Aparelhos e Utensílios .....	58
Figura 4.10-Prensa digital para ensaios CBR, Marshall e Triaxial .....	60
Figura 4.11-a) Partículas com vazios a serem preenchidos por água b) Partículas com os vazios preenchidos de água (EN 12697-5:2002) .....	61
Figura 4.12-Picnómetro utilizado no processo de vácuo.....	62
Figura 4.13-Provete após ser dividido em duas partes através de uma serra elétrica.....	64
Figura 4.14-Pescoço de cisne existente na caixa de corte .....	64
Figura 4.15-Peças fabricadas.....	65
Figura 4. 16-a) Superfície após raspagem. b) Escova utilizada para a raspagem.....	65
Figura 4.17-a) Aplicação da rega de colagem b) Resultado final da aplicação.....	66
Figura 4.18-Gráfico representativo da coesão vs temperatura .....	68
Figura 4.19-Mecanismo de Corte direto (Fonte Chen, et al., 2010).....	68
Figura 4.20-a) Provete após o ensaio de corte direto b) provete antes do ensaio ao corte direto.....	69
Figura 5.1-Comportamento esperado nos ensaios de corte (Fonte Chen, et al., 2010) .....	75
Figura 5.2-Comportamento dos provetes MB5% nos ensaios de corte direto para uma taxa de emulsão de 0,5 kg/m <sup>2</sup> .....	76
Figura 5.3-Comparação da resistência de ligação para cada tensão vertical aplicada nas diferentes taxas de emulsão utilizadas para a mistura MB5% .....	78

Figura 5.4-Comparação da resistência de ligação entre as três taxas de emulsão utilizadas para iguais tensões verticais. ....	80
Figura 5.5-Resistência máxima da rega de colagem obtida nos ensaios de corte direto para a mistura MB5,5% .....	81
Figura 5.6-Comparação da resistência de ligação para a mistura MB5,5%, entre as taxas de emulsão betuminosa utilizadas para iguais pressões verticais.....	83
Figura 5.7-Resultados obtidos para a resistência ao corte para cada taxa de emulsão betuminosa e tensão vertical da mistura MB5%. ....	85
Figura 5.8-Resultados de todos os ensaios executados á mistura MB5,5%.....	87
Figura Anexo B. 1-Curvas Granulométricas dos Agregados .....	113
Figura Anexo B. 2-Preparação da mistura MB5% com base no fuso granulométrico.....	114
Figura Anexo B. 3-Curva granulométrica da mistura MB5% .....	114
Figura Anexo B. 4-Preparação da mistura MB5,5% com base no fuso granulométrico...	115
Figura Anexo B. 5-Curva granulométrica da mistura MB5% .....	115
Figura Anexo B. 6-Reta de calibração do anel de 50 kN .....	116
Figura Anexo C.1-Provete nº12 da mistura MB5,0% antes e depois do ensaio de corte..	124
Figura Anexo C.2-Provete nº 8 da mistura MB5,0% antes e depois da rotura.....	126
Figura Anexo C. 3-Provete nº7 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	128
Figura Anexo C. 4-Provete nº1 da mistura MB5,0% antes e depois do ensaio de corte...	131
Figura Anexo C 5-Provete nº11 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte.....	132
Figura Anexo C.6-Provete nº10 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	134
Figura Anexo C.7-Provete nº9 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	136
Figura Anexo C.8-Provete nº8 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	138
Figura Anexo C.9-Provete nº2 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	140
Figura Anexo C.10-Provete nº3 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	142
Figura Anexo C. 11-Provete nº4 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte.....	144
Figura Anexo C.12-Provete nº6 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte .....	146
Figura Anexo C. 13-Provete nº1 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	148
Figura Anexo C. 14-Provete nº5 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	150
Figura Anexo C. 15-Provete nº9 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte.....	152
Figura Anexo C. 16-Provete nº11 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	154
Figura Anexo C. 17-Provete nº13 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	156
Figura Anexo C. 18-Provete nº4 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	158
Figura Anexo C. 19-Provete nº14 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	160
Figura Anexo C. 20-Provete nº12 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	162
Figura Anexo C. 21-Provete nº3 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	164
Figura Anexo C. 22-Provete nº7 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	166
Figura Anexo C.23-Provete nº6 da amostra MB5,5% após o ensaio de corte .....	168
Figura Anexo C. 24-Provete nº10 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte .....	170



## Índice de Quadros

Quadro 2.1-Propriedades de uma mistura betuminosa e variáveis que influenciam essas propriedades (Fonte Silva, 2005). .....	11
Quadro 2.2-Tipos de Pavimentos (adaptado de Branco, et al., 2008) .....	13
Quadro 2.3-Requisitos granulométricos para o fíler (Fonte de Estradas de Portugal, S.A, 2012).....	22
 Quadro 3. 1-Alguns exemplos de ensaios para verificar a resistência da rega de colagem. (Fonte Mohammad, et al., 2012) .....	28
Quadro 3. 2-Seleção do tipo de emulsão betuminosa.....	32
Quadro 3.3-Designação para Emulsões betuminosas Aniônicas (Fonte de ASTM D 977.)	39
Quadro 3.4-Designação das Emulsões Betuminosas Catiônicas segundo a Norma Europeia EN 13808 (Fonte EN 13808: 2005).....	39
Quadro 3.5-Boas práticas na utilização de emulsões betuminosas (Fonte British Petroleum, 2008).....	46
 Quadro 4.1-Fuso Granulométrico (CEEP, 2009) .....	52
Quadro 4.2-Referências de temperatura a serem utilizadas para cada classe de betume de pavimentação (Fonte EN 1269-35:2004) .....	55
Quadro 4.3- Tempo máximo de referência de mistura do agregado com o ligante betuminoso (Fonte EN 1269-35:2004) .....	56
Quadro 4.4-Tempo de rotura médio da emulsão betuminosa para as diferentes taxas aplicadas. ....	67
 Quadro Anexo B. 1-Peneiração das Britas Graníticas.....	113
Quadro Anexo B. 2- Percentagem e quantidade (gramas) de cada material usado para a mistura MB5%.....	114
Quadro Anexo B.3-Características físicas dos provetes da mistura MB5,5% e resultados do ensaio Marshall.....	116
Quadro Anexo B. 4-Características físicas dos provetes da mistura MB5% e resultados do ensaio Marshall.....	117
Quadro Anexo B. 5-Características da mistura MB5,5% .....	117
Quadro Anexo B. 6-Características da mistura MB5% .....	118
Quadro Anexo B. 7-Baridade máxima da mistura MB5,5% .....	118
Quadro Anexo B. 8-Baridade máxima para a mistura MB5% .....	118
Quadro Anexo B. 9-Características Finais das misturas MB5% e MB5,5% .....	119



## Símbolos e Abreviaturas

$\alpha$ - Ângulo

$\varepsilon$ - Deformação Horizontal

°C- Graus Celsius

ASTM- American Society for Testing and Materials

b- Distância entre extremidades

Bt- Baridade máxima teórica

CEEP- Caderno de Encargos das Estradas de Portugal

cm- Centímetros

cm<sup>3</sup>-centímetros cúbicos

D- dimensão máxima do agregado

d- Dimensão mínima do agregado

Df- Deslocamento Final

Di- Deslocamento inicial

g- Gramas

$\gamma_{\text{betume}}$ - Massa volúmica do betume

Gf- Kilograma Força

h- Deslocamento horizontal

INIR- Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias

JAE- Junta Autónoma das Estradas

kN- kilonewton

kPa- kilopascal

$\Delta l$ - Variação do deslocamento vertical

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

M<sub>1</sub>- Massa da Brita 4/8

M<sub>2</sub>- Massa da Brita 4/12

M<sub>3</sub>- Massa do pó de pedra

M<sub>4</sub>- Massa do Fíler

M<sub>a</sub>- Massa de material agregado

$M_b$ - Massa de Betume  
 $MC$ - Medium curing  
 $mm$ - Milímetros  
 $M_p$ - Massa do picnómetro cheio de água  
 $M_{p+a}$ - Massa do picnómetro cheio de água + amostra  
 $M_s$ - Massa da amostra seca  
 $M_t$ - Massa Total  
 $M_v$ - Massa de vazios  
 $n$ - Percentagem de vazios (Porosidade da mistura)  
 $\emptyset$ - Diâmetro  
 $P_1$ - Peso do provete com superfície seca  
 $P_2$ - Peso do provete em água  
 $P_3$ -Peso do provete  
 $Pa$ - Pascal  
 $P_a$ - Percentagem de agregado  
 $P_b$ - Percentagem de betume em massa e volume  
 $P_{be}$ - Percentagem de ligante betuminoso na mistura  
 $PRN$ - Plano rodoviário Nacional  
 $RC$ - Rapid curing  
 $S$ - Área do deslocamento  
 $S_b$ - Grau de saturação  
 $S_{bt}$ - Grau de saturação do betume  
 $SC$ - Slow curing  
 $tb$ - Teor em betume  
 $TVB$ - Teor do volume de betume  
 $V$ - Volume da amostra  
 $V_a$ - Volume de agregados  
 $V_b$ - Volume de betume  
 $VMA$ - Volume de vazios do esqueleto betuminoso  
 $V_t$ - Volume Total  
 $V_v$ -Volume de vazios



$\rho_{\text{amostra}}$ - Baridade da amostra

$\rho_b$ - Massa volúmica de betume

$\rho_s$ - Massa volúmica do agregado seco

$\rho_t$ - Massa volúmica total



# *Capítulo 1*

---

## Introdução



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Um fator de extrema importância no desenvolvimento e expansão de um país são as suas infraestruturas de transporte. É através das mesmas que a acessibilidade é assegurada ao longo de todo território e entre qualquer ponto da sua geografia.

São várias as redes de transporte existentes, desde ligações férreas e aéreas a fluviais e marítimas, todas elas com extrema relevância ao longo dos tempos até à atualidade. Acerca das redes rodoviárias pode afirmar-se que têm uma importância acrescida no que toca ao desenvolvimento de um país.

Focando a análise em Portugal, até meados do século XX as ligações rodoviárias nacionais não asseguravam o conforto e a segurança dos seus utentes, não só devido à fraca qualidade dos pavimentos usados como também às modestas características das vias. Com a publicação do Plano Rodoviário em 1945, foram dados os primeiros passos no desenvolvimento de um programa para este tipo de infraestrutura de transporte em Portugal, sendo que o seu campo de aplicação abrangia as estradas nacionais e municipais. Este plano rodoviário foi um complemento adicionado aos já existentes Regulamento das Estradas Nacionais e dos Planos Gerais de Estradas da Madeira e Açores, publicados no mesmo ano. Estes três documentos viriam a ser a base da construção rodoviária dos quarenta anos seguintes.

Com a iminente necessidade de desenvolvimento do país de forma a acompanhar o fenómeno da globalização que foi surgindo na segunda metade do século XX, foi essencial uma revisão e ajustamento do Plano Rodoviário de 1945, sobretudo após a criação da comunidade europeia e posterior entrada de Portugal em 1986, e consequente aparecimento de novos compromissos internacionais. Esta versão melhorada visava colmatar lacunas do plano anterior a vários níveis, mas principalmente no que tocava à conceção dos pavimentos rodoviários, dando especial atenção ao acréscimo de tráfego denotado. Assim, o Plano Rodoviário de 1985 (PRN85) (JAE, 1985), veio melhorar consideravelmente a estrutura da rede rodoviária nacional, sendo que se adequava melhor à realidade e exigências da altura. (Branco, et al., 2008)

Tendo em conta que as vias de comunicação rodoviárias são uma parte fundamental no desenvolvimento de um território, ao seu pavimento são exigidas qualidade funcional e qualidade estrutural. A qualidade funcional advém da exigência dos utentes sobretudo no que diz respeito ao conforto e segurança na circulação. Já a qualidade estrutural, está relacionada com a capacidade do pavimento suportar as ações que nele serão aplicadas durante o seu período de vida, sem sofrer alterações que prejudiquem o seu funcionamento e qualidade funcional.

Os pavimentos rodoviários são normalmente dimensionados para um período de vida entre 20 a 30 anos, tendo como principal função assegurar e permitir uma circulação de veículos rodoviários com o maior conforto e segurança. Condicionando essa função existem variados fatores, como as solicitações de tráfego e as condições climatéricas, a textura do próprio pavimento, ou seja, a sua qualidade antiderrapante, o controlo de ruído provocado pelo rolamento dos veículos circulantes e ainda a própria cor e qualidades óticas do pavimento. (Branco, et al., 2008)

Nos anos 70, um grande número de pavimentos manifestou fissuração devido a uma má execução da ligação entre camadas. Segundo Lepert, et. al. (1992) mais de 5% das autoestradas francesas tiveram problemas de ligação entre camadas, provocando vários problemas no desempenho do pavimento. A título de exemplo, o aeroporto internacional de Osaka, Japão, em que o mau desempenho do pavimento deveu-se a problemas de má ligação entre as diversas camadas. Estes problemas têm tido mais incidência nos locais de grandes travagens como também nas zonas de viragem, onde o pavimento está sujeito a grandes esforços de tração e rotação. (Collop, et al., 2008) (Lepert, et al., 1992)

Várias investigações têm vindo a mostrar que uma fraca ligação entre camadas pode aumentar a tensão e o esforço na interface entre camadas, como pode-se observar na figura 1.1, fazendo com que o tempo de vida do pavimento seja reduzido. (Collop, et al., 2008)

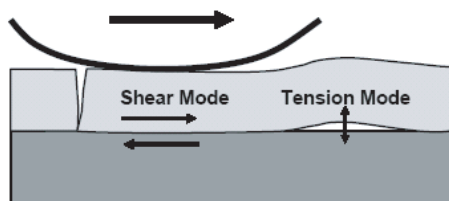


Figura 1.1- Distribuição das forças entre camadas num pavimento em serviço.  
(Mohammad, et al., 2012)

Os pavimentos rodoviários são constituídos por várias camadas, tendo isso em conta, as propriedades de ligação entre camadas são um fator importante para o bom funcionamento do pavimento. Quando a ligação entre elas não é bem executada o tempo de vida do pavimento sofre um significativo decréscimo. (Mohammad, et al., 2012)

A ligação entre camadas é assegurada através da aplicação de regas de colagem. A seleção da rega de colagem, a sua taxa de aplicação e a temperatura na altura da aplicação são fundamentais para o desenvolvimento da ligação adequada entre camadas do pavimento. Em geral, a seleção da rega de colagem tem sido baseada principalmente na experiência, conveniência e julgamento empírico do empreiteiro. Além disso, o controlo e testes que garantam a qualidade do processo de aplicação da rega de colagem raramente são realizados, tendo como resultado um desempenho inaceitável na interface do pavimento provocando a sua rutura prematura. (Mohammad, et al., 2012)

## 1.2.Objetivo

O objetivo desta dissertação consiste no estudo e análise laboratorial da rega de colagem, usando uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida, com o objetivo de conhecer a resistência máxima de ligação entre duas camadas betuminosas, para tal foi utilizado o ensaio de corte direto.

Para a obtenção destes objetivos foram realizados ensaios no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Nestes testes laboratoriais foram utilizadas três tipos de dosagens diferentes de emulsão betuminosa,  $0,3\text{kg/m}^2$ ,  $0,4\text{kg/m}^2$  e  $0,5\text{kg/m}^2$  e quatro tensões verticais diferentes, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Os ensaios foram realizados na máquina de corte direto, sendo necessário promover algumas adaptações, descritas no capítulo do procedimento experimental. Foram usadas duas misturas betuminosas, uma com 5% em massa de betume (MB5%) e outra com 5,5% em massa de betume (MB5,5%). Antes de aplicar a rega de colagem à mistura MB5,5% foi retirada a película superficial de betume de forma a simular um pavimento usado já gasto. Foi usada esta metodologia de forma a avaliar qual seria a taxa de emulsão betuminosa com os melhores resultados de ligação entre camadas.

Esta dissertação teve ainda como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre as emulsões betuminosas, pois é o material mais usado como rega de colagem em todo o Mundo. O

aprofundamento destes conhecimentos é importante, para um melhor entendimento dos cuidados a ter na altura da aplicação e armazenamento de uma emulsão betuminosa a ser usada como rega de colagem.

### 1.3.Estrutura da dissertação

Esta dissertação contempla 6 capítulos, onde são expostos os vários ensaios realizados e os estudos elaborados sobre o tema em causa.

O capítulo 1 é constituído por 3 subcapítulos, enquadramento teórico, onde é feita uma introdução do tema, objetivos, onde é descrito a finalidade desta dissertação e por fim um subcapítulo onde são expostos em forma de resumo todos os capítulos que compõem esta dissertação.

No capítulo 2 é apresentado uma descrição genérica da constituição de um pavimento rodoviário como também da constituição das misturas betuminosas.

O capítulo 3 é alusivo à rega de colagem, sendo dado mais ênfase às emulsões betuminosas. Este capítulo está dividido em quatro subcapítulos, enquadramento, ligação entre camadas betuminosas, seleção da rega de colagem e por fim condicionantes da aplicação da rega de colagem. No enquadramento é descrito de forma genérica o significado de rega de colagem e a sua finalidade. O subcapítulo seguinte aborda a nível teórico o efeito que o material usado na mistura betuminosa afeta a ligação entre camadas na presença de uma rega de colagem. São referenciados alguns testes que poderão ser postos em prática, com a finalidade de verificar a resistência da ligação entre camadas. No terceiro subcapítulo é feita uma abordagem teórica ao tipo de material que deve ser escolhido como rega de colagem consoante o tipo de obra a ser realizada e as suas condicionantes. Por fim, no último subcapítulo é descrito o que fazer e o que não fazer na altura de aplicar a rega de colagem.

O capítulo 4 descreve o processo experimental efetuado nesta dissertação.

O capítulo 5 é dedicado aos resultados obtidos com base nos ensaios efetuados e é feita uma análise aos valores alcançados.

No capítulo 6 são expostas as considerações finais e são referidos alguns pontos que poderão ser trabalhados no futuro.



## *Capítulo 2*

---

# Pavimentos Rodoviários e Misturas Betuminosas



## 2. Pavimentos Rodoviários e Misturas Betuminosas

### 2.1. Enquadramento

Um pavimento é constituído por um conjunto de camadas horizontais de espessura finita, apoiadas numa fundação constituída pelo terreno natural (figura 2.1), sendo considerado um sistema multiestratificado. Duas componentes podem ser distinguidas nos pavimentos rodoviários: “camadas ligadas”, onde se podem encontrar britas e areias, estabilizadas com ligantes; e as “camadas granulares”, constituídas por materiais britados ou naturais, não aglutinados, colocados na parte inferior do pavimento. Os pavimentos são constituídos por vários estratos que podem ser avaliados pelas suas funções. A camada superficial vai sendo desgastada pelo uso enquanto o corpo do pavimento assegura a resistência do mesmo. Sendo o corpo do pavimento o principal responsável pelo suporte das cargas do tráfego é fundamental que este contenha camadas granulares, podendo ainda levar camadas estabilizadas com ligantes betuminosos ou hidráulicos. (Branco, et al., 2008)

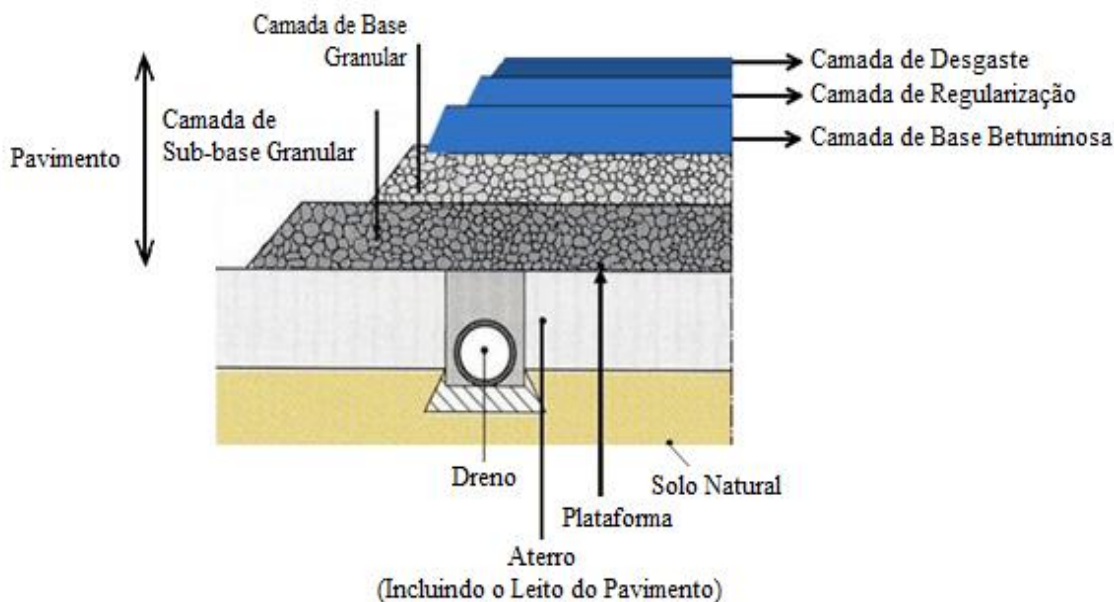


Figura 2.1- Diagrama esquemático de um Pavimento Rodoviário (INIR, 2009)

Os estratos sub-base e base granulares conferem resistência mecânica aos pavimentos de modo a suportarem as cargas verticais geradas pelo tráfego rodoviário, de modo a que as deformações verticais estejam entre valores admissíveis. A espessura destas camadas

dependerá do nível de tráfego projetado como também das ações climáticas previstas para a zona de projeto. Em casos onde se verifica elevado tráfego rodoviário, as camadas granulares base e sub-base, deverão ser substituídas por materiais granulares tratados com ligante, sobretudo hidráulico. ( INIR, 2009)

As camadas superiores, base betuminosa, regularização e desgaste, são estratos ligados constituídos por material granular estabilizado com ligante, podendo ser ligante hidráulico, usado em pavimentos rígidos ou ligante betuminoso, usado em pavimentos flexíveis. A camada de desgaste sofre diretamente as agressões do tráfego e as agressões climáticas, estas por sua vez têm um grande contributo para a durabilidade da estrutura, sendo necessária uma escolha pormenorizada dos materiais que deverão ser utilizados para a camada de desgaste. ( INIR, 2009)

Cada estrato é caracterizado pelo comportamento mecânico dos seus materiais, sendo definido pelo seu módulo de deformabilidade (E) e pelo seu coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). O módulo de deformabilidade define a relação entre deformação e tensão, enquanto o coeficiente de Poisson define a relação entre deformações radiais e deformações axiais. (Branco, et al., 2008)

Antes da produção de uma mistura betuminosa é fundamental realizar um estudo de cada situação específica de tráfego rodoviário e situação climática da zona onde será aplicada a mistura. No quadro 2.1 são indicadas propriedades que uma mistura betuminosa deverá conter como as variáveis que influenciam essas propriedades.

Quadro 2.1-Propriedades de uma mistura betuminosa e variáveis que influenciam essas propriedades (Fonte Silva, 2005).

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas
Flexibilidade	Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes	Granulometria Teor em betume Rigidez do betume
Estabilidade	Resistência às deformações plásticas (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga) -condições para baixos módulos de deformação da mistura	Textura da superfície do agregado Granulometria Teor em betume
Durabilidade	Resistência às ações climáticas (ar e água) e à ação abrasiva do tráfego	Granulometria Teor em betume Grau de compactação Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	Granulometria Teor em betume Grau de compactação Rigidez sem betume
Resistência à derrapagem	Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	Tipo e textura do agregado Resistência do agregado ao polimento Granulometria
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso da água às camadas inferiores	Granulometria Teor em betume Grau de compactação
Trabalhabilidade	Facilidade para realizar as operações de fabrico, colocação e compactação	Granulometria Teor em betume Tipo de betume e de agregado

As misturas betuminosas são constituídas por materiais granulares doseados de forma volumétrica e misturados numa central com ligante previamente determinado, estas poderão ser misturas a quente ou a frio. (Branco, et al., 2008)

As misturas a quente são fabricadas em centrais contínuas ou descontínuas. Nas centrais descontínuas (figura 2.2) os agregados e o betume são colocados na misturadora na quantidade exata para uma determinada obra. Após a mistura o material é colocado em camiões e transportado diretamente para o local da obra. Só se inicia nova produção quando é finalizada a fornada anterior. O fabrico nas centrais contínuas distingue-se do anterior por ser ininterrupto, ou seja, quando é iniciada uma nova produção não é necessário finalizar a anterior. (Branco, et al., 2008)

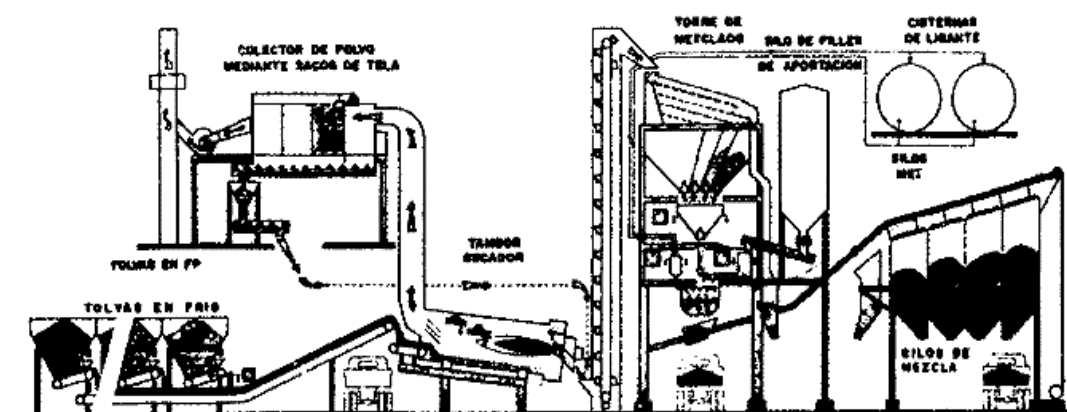


Figura 2.2-Exemplo esquemático de uma central descontínua (Branco, et al., 2008)

Nas misturas betuminosas a frio as centrais são mais simples, não sendo necessário aquecer o material. As centrais são compostas por silos de armazenamento dos agregados a frio, por um sistema de pesagem e transporte para o misturador, possuindo também um sistema de armazenamento e pesagem para a emulsão asfáltica. A produção destas misturas é normalmente feita num esquema contínuo. (Branco, et al., 2008)

## 2.2.Tipos de Pavimentos

Consideram-se usualmente três tipos de pavimentos rodoviários, em função dos materiais empregues: flexível, rígido e semirrígido. Nos pavimentos flexíveis, as camadas superiores são uma mistura betuminosa, encontrando-se entre essa e o leito do pavimento, material granular. De igual forma, os pavimentos semirrígidos são compostos numa parte superior por um estrato betuminoso, no entanto, entre esta e o leito do pavimento é utilizado material granular tratado com ligantes hidráulicos, o que tem uma forte influência na capacidade de carga do pavimento. O pavimento rígido difere dos anteriores na constituição da camada superior ou de desgaste, dado que esta é formada por um betão de elevada resistência e poderá assentar diretamente na fundação ou camada de base de materiais tratados com ligantes hidráulicos. (CEPSA, 2006)

O quadro 2.2 resume os tipos de pavimento, caracterizando-os conforme os materiais ligantes e deformabilidade.

Quadro 2.2-Tipos de Pavimentos (adaptado de Branco, et al., 2008)

Tipo de Pavimento	Materiais ligantes constituintes	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e Granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e Granulares	Muito Reduzida
Semi-Rígido	Hidrocarbonados, Hidráulicos e Granulares	Reduzida

### 2.3.Constituição das misturas betuminosas

#### 2.3.1.Ligante Betuminoso

O ligante betuminoso é um material adesivo contendo betume, podendo este encontrar-se modificado, não modificado ou emulsionado. (Estradas de Portugal, S.A, 2012)

O betume é um material não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto. Material completamente ou quase todo solúvel em tuloeno é muito viscoso a altas temperaturas e quase sólido à temperatura ambiente, trata-se de uma mistura muito complexa com múltiplos componentes, todos eles com diferentes composições químicas. (InIR) (Curtis, et al., 1993).

O betume é obtido através de dois processos de destilação, direta e no vácuo. O betume de destilação direta é obtido através da exsudação fracionada do petróleo bruto, como podemos ver na figura 2.4. Este processo passa em primeiro lugar pela destilação atmosférica, fazendo com que as frações mais leves do petróleo bruto passem ao estado gasoso e que as partículas mais pesadas se depositem no fundo do destilador sob a forma resíduo, designado por “resíduo sólido”. Durante o processo seguinte, que tem como nome destilação no vácuo, o “resíduo sólido” é aquecido a temperaturas entre os 350°C e 400°C e de seguida é transportado para uma coluna com pressões negativas na ordem dos 10 e 100mm mercúrio. A exposição do resíduo a estas pressões permite a separação física dos constituintes evitando

assim a degradação térmica. O resultado final deste processo é um segundo resíduo, que será usado na produção dos diferentes betumes asfálticos. (Ribeiro, 2012)

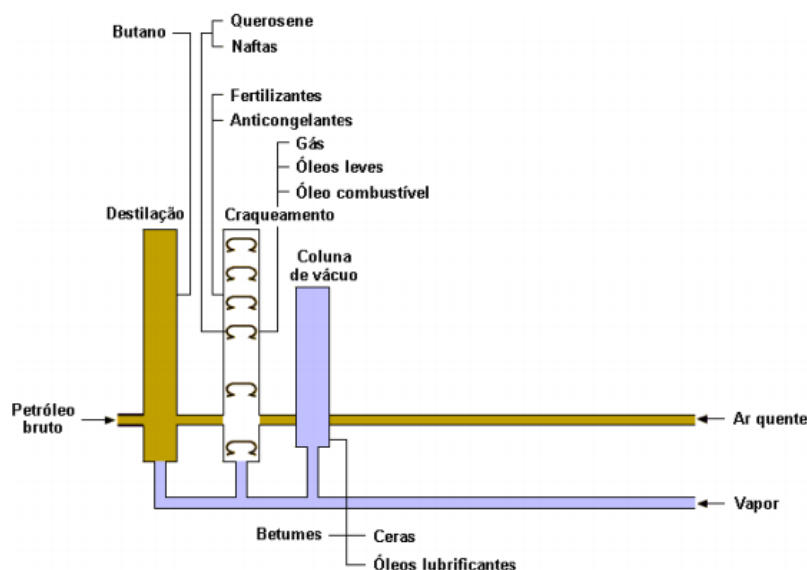


Figura 2.3-Representação esquemática da destilação do petróleo  
(adaptado Lombardi, 1993)

O betume é um produto de cor negra em que a sua composição dependerá da origem do petróleo bruto, tendo uma organização química com a seguinte ordem de percentagens; 82 a 88% de carbono, 8 a 11% de hidrogénio, 0 a 6% de enxofre e pequenas quantidades de oxigénio e azoto, podendo ainda conter vestígios de metais. (Branco, et al., 2008) (Read , et al., 2003).

O betume sofre várias alterações durante o seu período de vida, estas modificações começam logo na fase de fabrico com os processos de “tratamentos” que é sujeito no final da sua produção, este continua a sofrer alterações durante o tempo em que está em serviço devido aos efeitos de oxidação provocados pelo oxigénio existente no ar e a água da chuva. (Branco, et al., 2008)

Devido à sua complexa estrutura química torna-se difícil retirar toda a informação que nele existe. De forma a simplificar este processo foi necessário separar o betume em duas categorias químicas distintas, os asfaltenos e maltenos. Este último grupo pode ainda ser dividido em 3 categorias:

- Saturados: constituídos por hidrocarbonetos asfálticos leves, constituindo assim 5 a 20% do betume. De cor creme ou branca.



- Aromáticos: representa a maior percentagem no grupo dos maltenos, constituindo assim 40 a 65% do betume. Têm o nome aromático porque é constituído por aromáticos nafténicos<sup>1</sup>.
- Resinas: são compostas de hidrogénio e carbono, contendo também oxigénio, enxofre e nitrogénio em pequenas quantidades.

Na figura 2.4 pode-se observar a estrutura química dos asfaltenos, aromáticos e saturados.

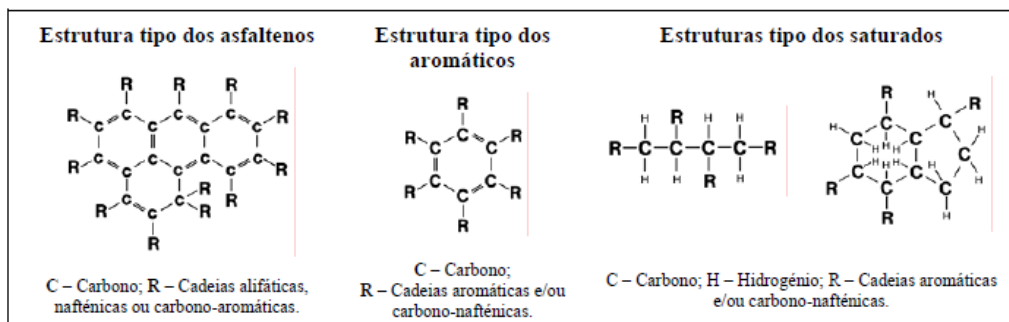


Figura 2.4-Representação esquemática da composição química dos Asfaltenos e Maltenos (Silva, 2005)

Existem diversos materiais betuminosos que podem ser usados como ligantes na construção de pavimentos rodoviários, sendo que atualmente apenas se utilizam derivados da destilação do petróleo bruto. (Branco, et al., 2008)

O betume asfáltico ou betume de pavimentação é o ligante mais usado na construção de pavimentos rodoviários em Portugal e provém da destilação do petróleo bruto. À temperatura ambiente apresenta-se em estado semissólido sendo assim necessário fluidifica-lo temporariamente para que este possa ser usado na construção rodoviária. (Branco, et al., 2008)

Os betumes de pavimentação são designados através do seu valor de penetração a 25°C, estas designações são adotadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), sendo elas as seguintes: 10/20; 20/30; 35/50; 50/70; 70/100; 100/150; 160/220; 250/300.

Na figura 2.5 estão representados os tipos de betume de pavimentação e as suas propriedades

<sup>1</sup> Extratos (petróleo) de solventes destilados nafténicos pesados, concentrados em aromáticos; extrato aromático destilado tratado.

	Betume de Pavimentação					
	10/20	15/25	20/30	35/50	50/70	160/220
Penetração a 25 °C, 100g, 5s (0,01mm)	10 - 20	15 - 25	20 - 30	35 - 50	50 - 70	160 - 220
Temperatura de amolecimento	60 - 70 °C	55 - 71 °C	55 - 63 °C	50 - 58 °C	46 - 54 °C	35 - 43 °C
Varição de massa, após RTFOT, máxima	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	1%
Penetração retida, após RTFOT, mínima	55%	55%	55%	53%	50%	37%
Aumento da temperatura de amolecimento, após RTFOT, máximo	10 °C	10 °C	10 °C	11 °C	11 °C	12 °C
Temperatura de inflamação, mínima	245 °C	245 °C	240 °C	240 °C	230 °C	220 °C
Solubilidade, máxima	99%	99%	99%	99%	99%	99%
Ponto de fragilidade de Fraass, máximo	-	-	-	- 5 °C	- 8 °C	- 15 °C
Viscosidade cinemática a 135° C, mínima	700 mm <sup>2</sup> /s	600 mm <sup>2</sup> /s	530 mm <sup>2</sup> /s	370 mm <sup>2</sup> /s	295 mm <sup>2</sup> /s	135 mm <sup>2</sup> /s

Figura 2.5-Classificação do betume de pavimentação (Fonte Branco, et al., 2008)

As duas propriedades principais para a caracterização de um betume são, a penetração e a temperatura de amolecimento. A penetração é caracterizada pela distância medida em milímetros (mm) da profundidade que penetra uma agulha com certas medidas, onde é exercida uma força de 100gf durante um período de 5 segundos a uma temperatura de 25°C. A temperatura de amolecimento é determinada através do ensaio do anel e bola. (Branco, et al., 2008)

Em Portugal os betumes geralmente mais usados são do tipo 35/50, 50/70 e o 160/220. Tendo em conta que são usados em função do tipo de solicitação a que vão estar sujeitos, bem como em função das condições climáticas do local onde irão ser usados. O betume 50/70 é o mais usado correntemente. Por outro lado, o betume 35/50 tem maior utilização nas regiões mais quentes do nosso país e o betume 160/200 é usado para a execução de emulsões betuminosas e para revestimentos superficiais.

O betume asfáltico modificado foi presente ao público na década de 70 na Europa, sendo que vinte anos mais tarde, nos anos 90, começou a ser utilizado em Portugal, de forma a fazer face ao crescimento do tráfego que se fazia notar na altura. A aplicação dos betumes modificados é direcionada para as camadas estruturais de modo a reduzir a sua espessura, deformações permanentes e aumentar a vida útil do pavimento. Este tipo de betume também é usado para camadas de desgaste com betão betuminoso poroso, com o objetivo de melhorar a segurança, conforto, diminuir o ruído devido ao rolamento, aderência, regularidade do

pavimento e aumentar a sua capacidade para resistir às ações dos agentes atmosféricos. (Branco, et al., 2009)

Temos ainda as emulsões betuminosas, que são consideradas um sistema de duas fases constituído por betume e água+emulsificante podendo conter um ou mais aditivos de forma a assistir na formação, estabilização e modificação das propriedades da emulsão. As emulsões são divididas em quatro grupos, catiónicas, aniónicas, não iónicas e emulsões de argila estabilizada, sendo as mais utilizadas para pavimentos rodoviários as emulsões catiónicas e aniónicas. A escolha entre uma emulsão catiónica e aniónica dependerá do tipo de agregado usado na formulação da mistura betuminosa. Os agregados que se ionizam positivamente têm maior interação com emulsões de carga negativa (aniónicas), enquanto agregados que se ionizam negativamente têm maior interação com emulsões de carga positiva (catiónicas). As emulsões betuminosas são usadas em variados cenários, como por exemplo, regas de impregnação, regas de colagem e de cura, revestimentos superficiais, misturas abertas a frio, em camadas granulares tratadas com emulsão, lamas asfálticas, em camadas de sub-base e bases tratadas com ligante hidráulico e microaglomerados betuminosos. (Read , et al., 2003)

### 2.3.2.Agregados

A utilização dos agregados é crucial para a formação de um esqueleto pétreo que seja suficientemente resistente às ações do tráfego, estes constituem 90 a 95% do peso da mistura betuminosa tendo uma percentagem de 75 a 85% do volume total da mistura e deverão ser analisados ao nível da sua origem geológica, composição química, geometria e resistência mecânica. Para que o pavimento tenha um bom desempenho é necessário garantir uma boa homogeneidade das partículas, ter conhecimento de onde provem o material, garantir um adequado transporte para a obra e por fim concretizar um bom espalhamento em obra. (Branco, et al., 2008). (JAE, 1995)

As características responsáveis para o melhor ou pior desempenho de uma mistura betuminosa (figura 2.6) são as dimensões dos agregados, resistência, limpeza, forma e textura. Por estas razões não deverão ser utilizados agregados com texturas muito lisas e formas arredondadas, isto fará com que a adesividade entre agregado e ligante seja fraca, provocando assim uma diminuição na resistência à deformação permanente.

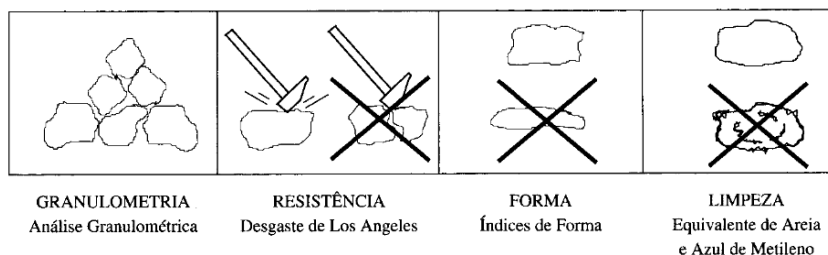


Figura 2.6- Características importantes do material granular (Branco, et al., 2008)

A configuração dos agregados é dada pelo índice de forma, percentagem de partículas alongadas e lamelares existentes nos agregados, sendo que o excesso de partículas lamelares diminuirá a estabilidade da mistura betuminosa devido à sua fragilidade. (Silva, 2005)

$$1,5 \times \frac{d+D}{2} \quad (2.1)$$

$$0,6 \times \frac{d+D}{2} \quad (2.2)$$

Onde:

- d-Dimensão mínima do agregado
- D-Dimensão máxima do agregado

Partículas com comprimentos superiores ao valor dado pela equação (3.1), são consideradas partículas alongadas e valores inferiores à equação (3.2) são considerados lamelares. Na figura 2.7 está representado um equipamento utilizado para determinar os índices de lamelação (a) e alongamento (b).

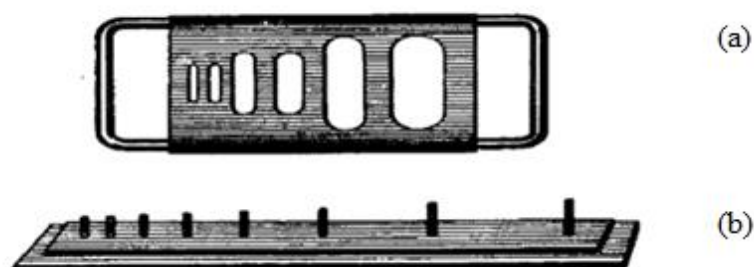


Figura 2.7- Material para determinar os índices de lamelação (a) e alongamento (b)

(Fonte de Branco, et al., 2008)

Na figura 2.8 pode-se observar o tipo de agregado usado em algumas regiões de Portugal Continental, sendo que nos Arquipélagos da Madeira e Açores o basalto é o tipo de agregado mais comum.

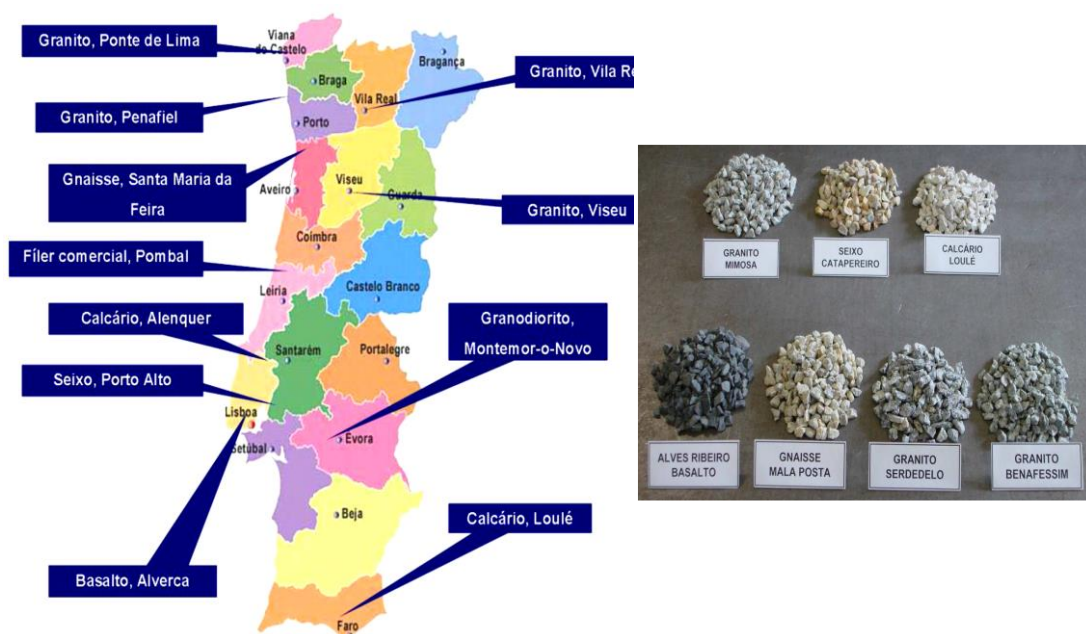


Figura 2.8-Mapa de Portugal Continental com a identificação do tipo de agregado explorado na conceção dos pavimentos rodoviários (Branco, et al., 2009)

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CEEP), propõe a utilização de materiais pétreos, britados ou naturais para a realização de misturas betuminosas a serem utilizadas em pavimentos rodoviários. (Branco, et al., 2008)

O agregado é um material granular, podendo ser natural, artificial ou reciclado. Agregados naturais e artificiais são de origem mineral, sendo que o primeiro estará apenas sujeito a processamento mecânico e o segundo além do processamento mecânico também será sujeito a um tratamento industrial, modificações térmicas e a outros processos necessários para a sua utilização. Dentro dos agregados naturais podemos ter duas classes, tal como pode-se observar no diagrama da figura 2.9.

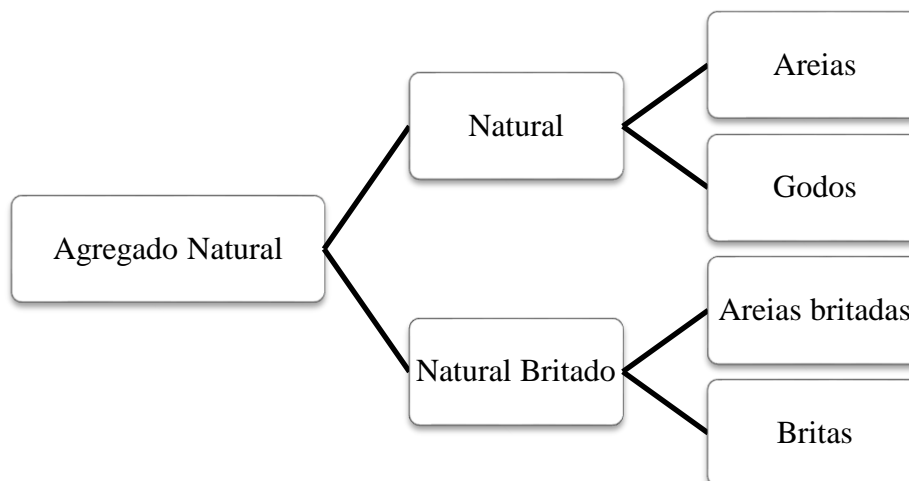


Figura 2.9-Diagrama dos agregados naturais

Os agregados naturais devem apresentar-se homogêneos e pouco alterados, não contendo material orgânico, vidro, plástico e madeira. A presença deste material nos agregados fará com que a mistura perca resistência mecânica e outras propriedades. (CEEP, 2009)

Os agregados reciclados são obtidos através da reutilização de materiais já existentes em obras anteriores, daí a sua composição ser muito diversificada. A constituição destes agregados dependerá das práticas de construção usadas no local de onde foram retirados, daí ser obrigatório executar uma triagem de forma a obter a melhor seleção do material existente. Deve ser impedida a presença de materiais prejudiciais ao meio ambiente como também materiais que afetem o bom desempenho dos elementos em que este irá ser utilizado. (Bernucci, et al., 2008)

Após a escolha do agregado a ser utilizado na mistura betuminosa é necessário encontrar a melhor relação entre agregados finos e grossos, sendo assim utilizado o método de peneiração de forma a encontrar a curva granulométrica que mais se adequará a situação pretendida. A figura 2.10 constitui um exemplo de uma curva granulométrica com três agregados diferentes, um com uma granulometria uniforme (2), outro agregado com uma má graduação (3) e um agregado com elementos de várias dimensões proporcionando um melhor encaixe entre as partículas (1). (Branco, et al., 2008)

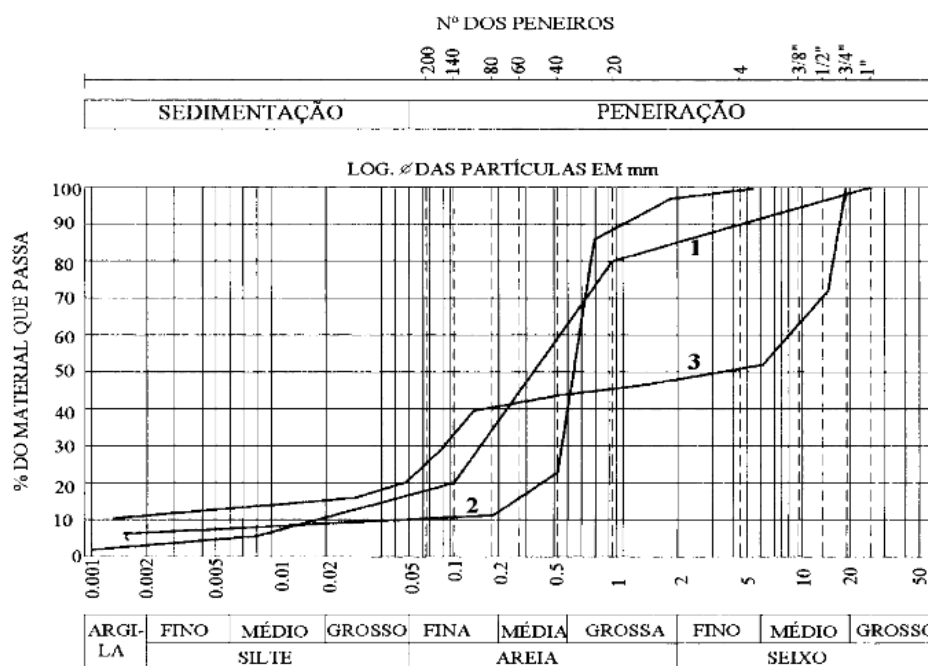


Figura 2.10-Exemplo da curva granulométrica para três agregados diferentes.

(Branco, et al., 2008)

Após a escolha da melhor relação entre agregados finos e grossos a curva granulométrica final de uma mistura betuminosa deverá estar entre os limites superiores e inferiores do fuso granulométrico pretendido.

O nível de desempenho de um agregado dependerá das propriedades da rocha mãe, daí ser importante a informação sobre o tipo de rocha, a sua composição mineralógica, composição química, a sua tendência á degradação e o seu potencial de adesão ao ligante betuminoso. São apresentadas as características e propriedades dos agregados para a camada de desgaste, porque foi o estrato de pavimento usado na fase experimental do presente estudo.

### 2.3.3.Fíler

É designado de fíler todo o material que passa pelo peneiro com uma abertura de malha de 0,63 mm e que pelo menos 85% do material passe pelo peneiro nº 100 (0,125 mm) e que 70% do material passe pelo peneiro nº200 (0,063 mm). (Branco, et al., 2009)

Devido às suas características físicas e químicas o fíler adiciona propriedades influentes às misturas betuminosas, como uma melhor ligação entre betume-agregado, trabalhabilidade,

sensibilidade à humidade, rigidez, durabilidade e uma maior resistência à fadiga a longo prazo. (Modarres, et al., 2014)

Existem duas classes de fíleres, recuperados ou comerciais. Os primeiros resultam no processo de fabrico das misturas betuminosas, ou seja, por recuperação dos finos usando sistemas de recuperação adequados. Estes poderão ser de qualquer natureza petrográfica, dependendo do agregado utilizado na formulação da mistura betuminosa utilizada. Os fíleres comerciais são fabricados em instalações industriais, estes deverão ser de origem calcária, cimento do tipo Portland, cal hidráulica ou cinzas volantes. (Estradas de Portugal, S.A, 2012)

No quadro 2.3, estão expostos os requisitos granulométricos que o fíler deverá cumprir para poder ser utilizado em misturas betuminosas.

Quadro 2.3-Requisitos granulométricos para o fíler (Fonte de Estradas de Portugal, S.A, 2012)

Dimensão dos peneiros (mm)	Percentagem acumulada do material passado	
	Limites inferiores e superiores para resultados individuais	Amplitude máxima da granulometria declarada pelo produtor
2	100	-
0,125	85-100	10
0,063	70-100	10
(a) Ver norma NP EN 13043, seção 5.2.1		



### *Capítulo 3*

---

## **Rega de Colagem em Pavimentos Rodoviários**



### 3. Rega de Colagem em Pavimentos Rodoviários

#### 3.1. Enquadramento

Ao longo do tempo os pavimentos rodoviários foram sofrendo melhorias devido a várias análises feitas aos diferentes mecanismos de rotura e suas causas, aos métodos de construção e ao melhoramento substancial da escolha dos materiais usados. Um dos problemas mais comuns relacionado com o mau desempenho de um pavimento rodoviário tem como principal causa uma fraca ligação entre camadas, provocando fendas e deslizamento na interface de duas camadas. Um dos métodos construtivos usado para melhorar a ligação entre camadas é o uso de rega de colagem, sendo que o produto mais usado como rega de colagem são as emulsões betuminosas. (Raposeiras, et al., 2013)

A rega de colagem é uma leve aplicação de ligante, geralmente emulsão betuminosa, utilizada para assegurar uma boa ligação entre camadas do pavimento rodoviário e para garantir que estas se comportem como um sistema único, com o objetivo de suportar as cargas que serão incitadas pelo tráfego rodoviário. A aplicação da rega de colagem é normalmente feita numa superfície de pavimento existente antes de se sobrepor uma nova camada. (Mohammad, et al., 2012)

A seleção do material a ser usado como rega de colagem e a sua taxa de aplicação são fatores fundamentais para o desenvolvimento de forças de ligação entre as camadas do pavimento. Em geral, a seleção da rega de colagem tem sido baseada principalmente na experiência, conveniência e julgamento empírico do empreiteiro, fazendo com que o controle na qualidade aquando da inserção da rega de colagem no pavimento raramente seja realizado, isto faz com que por vezes seja utilizado material inadequado à situação em causa. O comportamento e a durabilidade de um pavimento betuminoso está diretamente relacionado com a adequada aplicação e qualidade do material utilizado como rega de colagem. (Raposeiras, et al., 2013) (Mohammad, et al., 2012)

Neste capítulo será dado mais destaque às emulsões betuminosas, por ser o material mais utilizado como rega de colagem e também por ter sido o material usado na fase experimental desta dissertação.

### 3.2.Ligação entre camadas betuminosas

A ligação entre agregado e ligante betuminoso tem uma importância elevada na durabilidade de um pavimento rodoviário e na interligação entre camadas. A interação entre agregado/ligante é fortemente influenciada pela composição química e superfície dos agregados, ou seja, ligantes betuminosos com grupos funcionais polares são altamente atraídos para locais que contenham espécimes carregadas ou que contenham metais nos agregados. As interações entre agregado/ligante são dominadas pelo agregado para fins de adesão e de sensibilidade à água e dominadas pelo ligante quando existem falhas coesivas no ligante betuminoso. (Curtis, et al., 1993)

A maioria dos materiais granulares são compostos por cargas negativas ou positivas devido aos minerais que compõem a rocha mãe, sendo assim necessário escolher o tipo de rega de colagem correcto para assegurar uma boa carga-atração entre o tipo de rega de colagem e agregado. Em Portugal Continental predominam agregados graníticos, calcários e aluvionares, sendo que nas Regiões Autónomas da Madeira e Açores predominam agregados basálticos. Os agregados basálticos e calcários apresentam cargas electro-positivas, enquanto os agregados do tipo granitos, arenitos e quartezitos apresentam cargas electro-negativas, fazendo com que nas regiões Autónomas o uso de emulsões aniónicas seja o mais recomendável devido à sua carga electro-negativa, proporcionando assim uma melhor ligação entre agregado e emulsão. Em Portugal continental será necessário um conhecimento prévio do material granular utilizado nas misturas, para que seja efectuada a escolha correcta da emulsão betuminosa. (Branco, et al., 2009) (Bernucci, et al., 2008).

A interação entre as camadas também é afetada por outros fatores, como as características da superfície do pavimento (constituição do betume, tipo de agregado e textura da superfície), as condições ambientais, o material usado como rega de colagem (tipo de material, taxa de aplicação, tempo de rotura, temperatura na fase de aplicação) e as condições de limpeza do pavimento. (Al-Qadi, et al., 2012)

Não são só as propriedades de adesão do ligante que fazem com que exista uma boa ligação entre camadas, a compactação da mistura é muito importante para o desenvolvimento de uma boa ligação entre camadas, porque em misturas pouco compactadas e especialmente na presença de água, a rotura acontece prematuramente fazendo com que o ligante descole do agregado e provoque a rotura agregado-ligante. Em casos mais graves a desagregação da

mistura acontece na camada superficial do pavimento e de acordo com Scholz (1995), os efeitos de uma ligação fraca entre ligante-agregado eleva a tendência para a desagregação da mistura, para um módulo de rigidez mais reduzido e para uma menor capacidade de resistir às tensões provocadas pelo tráfego, fazendo com que o risco em aparecer assentamentos e fissuras no pavimento seja mais elevado. (Scholz, 1995) (Silva, et al., 2007). As condições geométricas do agregado na interface também exercem um papel importante para uma boa ligação, independentemente das propriedades mecânicas do ligante e dos agregados e segundo o estudo feito por Raab, et al., (2011) sobre a ligação de camadas betuminosas concluiu-se que, tanto a geometria como a combinação de agregados, como pode ser observado na figura 3.1, é influente para uma boa ligação entre camadas. Foram obtidos valores mais elevados ao corte com uma combinação de agregados pequenos/grandes, criando uma estrutura mais compacta do que para uma combinação grande/grande e grande/pequeno, onde atingiram valores mais baixos no teste de resistência ao corte. (Raab, et al., 2011)



Figura 3.1-Comparação entre dois espécimes, Esquerda: pequenos/grandes, Direita: grandes/pequenos (Raab, et al., 2011)

Como tem sido referido neste capítulo a durabilidade e manutenção dos pavimentos rodoviários depende de vários fatores que influenciam a ligação entre camadas do pavimento. A ligação entre camadas é responsável pelo pavimento funcionar como um todo, reduzindo assim a deformação e fissuração causadas pelo tráfego rodoviário. Uma fraca ligação entre camadas poderá causar uma má transferência de esforços, levando a que exista escorregamento entre camadas, fissuração prematura e descolagem. Este tipo de patologias é o resultado de um excesso de tensão concentrada na base da camada superficial. (Curtis, et al., 1993)

Nos últimos 30 anos vários investigadores desenvolveram métodos para verificar a resistência da ligação entre camadas, sendo que em todas as investigações realizadas a

conclusão em termos de variáveis mais influentes foram as mesmas, tipo de rega de colagem, taxa de aplicação da rega de colagem, tipo de mistura, características da superfície de aplicação, temperatura e tempo de cura da emulsão. (Raposeiras, et al., 2013) (Medeiros, et al,2012)

Segundo Raposeiras, et al., (2013) os ensaio de verificação da qualidade de uma rega de colagem em diferente condições e tipos de pavimentos, poderão ser agrupados em três tipos de conjuntos.

- Ensaio de tração
- Ensaio ao corte ou cisalhamento
- Teste à flexão (binário de forças)

No quadro 3.1 estão descritos alguns ensaios que poderão ser efetuados de modo a identificar as propriedades da rega de colagem como também a sua adequabilidade com o tipo de material que irá ser utilizado.

Quadro 3. 1-Alguns exemplos de ensaios para verificar a resistência da rega de colagem. (Fonte Mohammad, et al., 2012)

Tipo de teste	Procedimento experimental	Resultados esperados	Lab.ou In Situ <sup>a)</sup>	Explicação do Teste	Obs. <sup>b)</sup>
Leutner Shear Test	Uma carga vertical é aplicada a uma amostra composta por duas camadas a uma velocidade constante até à rotura.	1) Carga máxima de corte 2) Deslocamento máximo correspondente	Lab	A carga máxima de corte e o deslocamento são medidas de forma a avaliar a propriedade de ligação na interface das camadas.	Não é aplicada nenhuma carga axial
LTRC Direct Shear test	Uma carga horizontal é aplicada sobre uma amostra composta por duas camadas betuminosas a uma velocidade constante.	Tensão de corte máxima	Lab	É medida a resistência ao corte. O valor retirado do ensaio servirá para determinar a adequação do material usado como rega de colagem.	1) Carga axial é opcional 2) Desenvolvido por Louisiana Transportation Research Center

TTI Torsional Shear Test	É aplicado um momento torsor e uma carga vertical a uma amostra composta por duas camadas a uma velocidade constante até à rotura da ligação.	Tensão de Corte máxima	Lab.	A força de torção aplicada serve para medir e avaliar a resistência da interface de ligação e a qualidade da rega de colagem.	Desenvolvido por Texas Transportation Institute
Florida Direct Shear Test	Uma carga vertical de corte é aplicada a uma amostra de duas camadas coladas entre si. A força é aplicada de forma constante até à rotura.	Força de corte máxima	Lab.	Força de ligação da rega de colagem e é medida a sua performance.	1) Carga axial não pode ser aplicada durante o teste 2) Desenvolvido por Florida DOT
ASTRA Interface Shear Test	Uma carga horizontal de corte é aplicada a uma amostra de duas camadas com uma velocidade constante. É também aplicada uma força normal no topo da camada superior	Resistência ao Corte	Lab.	Tensão de corte máxima na interface das duas camadas	Se forem aplicadas diferentes esforços axiais obtém-se a envolvente de rotura de Mohr-Coulomb
Laborato de caminos de Barcelona Shear Test (LCB)	Uma amostra composta por duas camadas, é assente entre dois apoios e é aplicada uma carga vertical com velocidade constante entre os dois apoios até à rotura.	1) Força de corte 2) Módulo de corte e a energia específica de fissuração	Lab.	A resistência ao corte é medida de forma a avaliar as propriedades da ligação. Os valores obtidos serão usados para definir a qualidade da rega de colagem.	1) Não podem ser aplicadas forças axiais durante o teste. 2) Desenvolvido por DOT, Universidade técnica da Catalunha, Espanha
NCAT Shear Test	Uma carga vertical é aplicada na interface de duas camadas com uma velocidade constante até à rotura da ligação.	Força de ligação	Lab.	A força de ligação é medida de forma a quantificar a sua evolução. As propriedades medidas são usadas de forma a determinar a qualidade e adequação do material usado como rega de colagem.	Desenvolvido por National Center of Asphalt Technology. (NCAT)

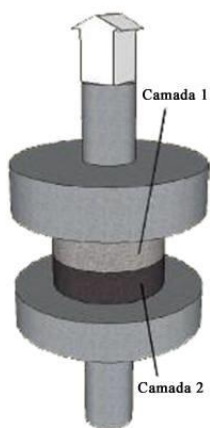
HasDell EBSTTM Emulsion Shear Test	É aplicada uma força de corte ao longo da interface de ligação de duas camadas até que a ligação quebre.	Força de ligação máxima	Lab. ou In Situ	A força de ligação é medida entre duas camadas, de forma a determinar a qualidade do material usado como rega de colagem.	Comercializado por R/H Specialty and Machine, Terre Haute, Indiana
Torque Bond Test	É aplicado um binário de forças a uma amostra de um pavimento rodoviário com uma chave dinamométrica até que a ligação seja quebrada.	Força de ligação	In Situ	Um binário de forças é aplicado para medir a evolução da ligação.	Desenvolvido pela Highway Agency, Reino Unido
Layer-Parallel DirectShear (LPDS)	É aplicada uma força vertical sobre um provete, a uma velocidade de rotura constante.	Resistência à rotura	Lab.	A tensão média de corte e a máxima rigidez de corte são medidas para determinar as propriedades das camadas. Este teste é usado para avaliar a qualidade das misturas e as propriedades do material usado como rega de colagem.	Teste modificado por EMPA, Swiss Federal Laboratory
Atacker™ Test	É aplicada uma força de tração ou <i>Pull-off</i> , para "descolar" duas camadas ligadas por uma rega de colagem.	1) Resistência à tração 2) Força de Corte	Lab. ou In Situ	É testada a resistência, ao corte e à tração, da rega de colagem de forma a determinar a qualidade da ligação.	Desenvolvido pela empresa Introtek, Inc.
UTEP Pull-Off test	É aplicada uma força de tração para "descolar" duas camadas coladas com uma rega de colagem.	Resistência máxima da rega de colagem	Lab. ou In Situ	É medida a resistência da rega de colagem a fim de determinar as suas propriedades de ligação e saber se é adequada a sua aplicação.	Desenvolvido pela Universidade do Texas em El Paso
Wedge-Splitting Test	Uma carga vertical de corte é aplicada a uma força constante na interface de ligação entre duas camadas.	1) Resistência máxima da rega de colagem 2) Força Vertical máxima para existir rotura	Lab.	É medida a força vertical máxima para que exista "descolagem" entre as duas camadas. Fator determinante para ficar a conhecer a adequação da rega de colagem	Teste desenvolvido pela Universidade Técnica da Áustria.

a) Testes que poderão ser executados em laboratório ou no local da obra (in situ).

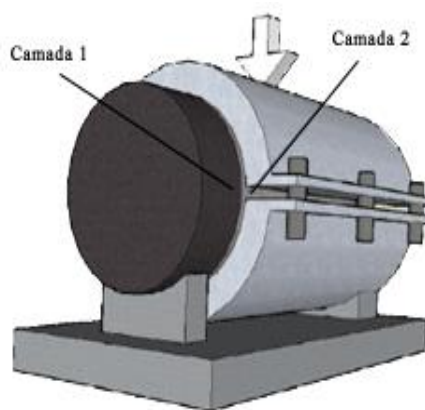
b) Observações

Na figura 3.2 estão representados alguns ensaios usados para analisar a resistência da ligação entre camadas betuminosas.

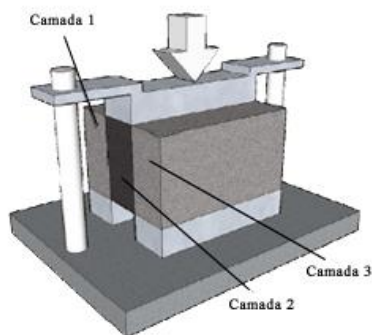




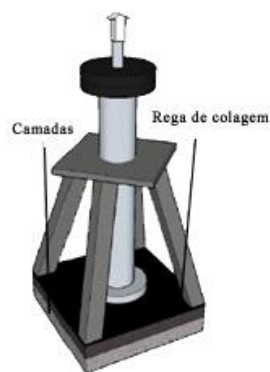
ENDACMA (ensaio de tração)



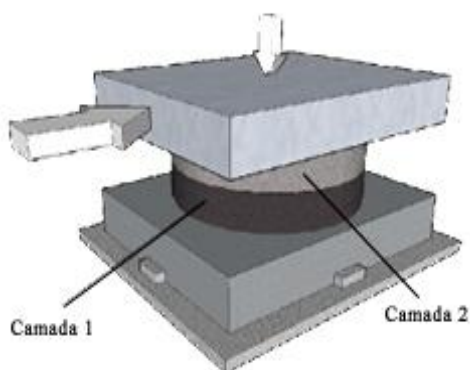
LCB ensaio de corte



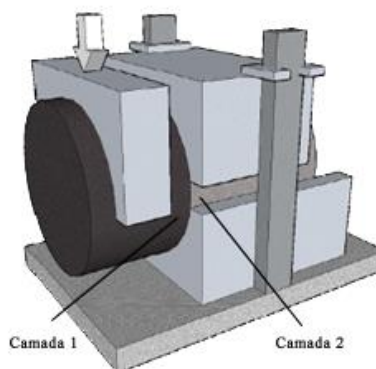
Ensaio de corte duplo



UTEP ensaio de Pull-off



ASTRA ensaio de corte



LPDS teste

Figura 3.2-Exemplo de testes que poderão ser realizados para verificar a resistência da rega de colagem (Fonte Raposeiras, et al., 2013)

### 3.3. Seleção da Rega de colagem (Emulsões Betuminosas)

O tipo de material usado como rega de colagem tem uma grande influência na ligação entre camadas, tendo que para vários investigadores a seleção do material a ser usado como rega de colagem tem uma maior influência na ligação quando comparado com a quantidade usada. No processo de escolha do material a ser usado como rega de colagem, várias instituições dão preferência às emulsões betuminosas de rotura rápida em vez de cimento asfáltico ou betumes fluidificados. (Mohammad, et al., 2012)

Como já foi referido anteriormente o material mais usado como rega de colagem são as emulsões betuminosas e segundo o CEEP “*Entende-se por rega de colagem a aplicação de uma emulsão betuminosa sobre: camadas tratadas com ligantes betuminosos, camadas em misturas betuminosas ou camadas/superfícies de betão sobre a qual será aplicada uma mistura betuminosa. Estas regas poderão ser realizadas com emulsões ou emulsões modificadas...*”.

A seleção da emulsão betuminosa é feita pelo empreiteiro, tendo este a opção de escolher e usar qualquer emulsão ou ligante asfáltico, desde que esteja em conformidade com as normas em vigor. O quadro 3.2 identifica quais as características do tipo de rotura que a emulsão betuminosa deverá ter, consoante o tipo e condições da obra onde será aplicada. (Division of Construction California Department of Transportation, 2009)

Quadro 3. 2-Seleção do tipo de emulsão betuminosa

Características do tipo de rotura de uma Emulsão Betuminosa			
Rotura Rápida	Elevada coesão inicial	Usada para trabalhos noturnos, e com tempos de construção curtos.	Usada em climas frios.
Rotura Média	Reduzida percentagem de finos (misturas abertas)	Boa para uso em construções durante a noite.	Boa para climas frios
Rotura Lenta	Misturas com elevadas percentagens de finos	Não deve ser usada em climas frios, durante a noite e em períodos com uma janela de construção curta.	Mais usada em Bases tratadas com emulsões; Slurry Seal <sup>1</sup> e micro aglomerados a frio e misturas recicladas a frio in situ.
1- Slurry Seal é um micro aglomerado betuminoso a frio. É uma mistura betuminosa, rugosa e impermeável composta por uma emulsão, inerte fino bem graduado, cimento, aditivos e água nas proporções certas com uma consistência adequada para uma extensão em camadas contínuas.			

### 3.3.1. Emulsões Betuminosas

As emulsões betuminosas são usadas maioritariamente como rega de colagem, proporcionando uma ligação mais resistente entre camadas, estas são definidas como uma dispersão de dois líquidos imiscíveis, tornando-se assim um sistema heterogéneo composto por duas fases, contínua e descontínua. O meio aquoso (fase contínua) permite que o betume fique disperso em pequenas partículas designadas de micelas ou gotículas (fase descontínua), como pode-se observar na figura 3.3. (Branco, et al., 2008)

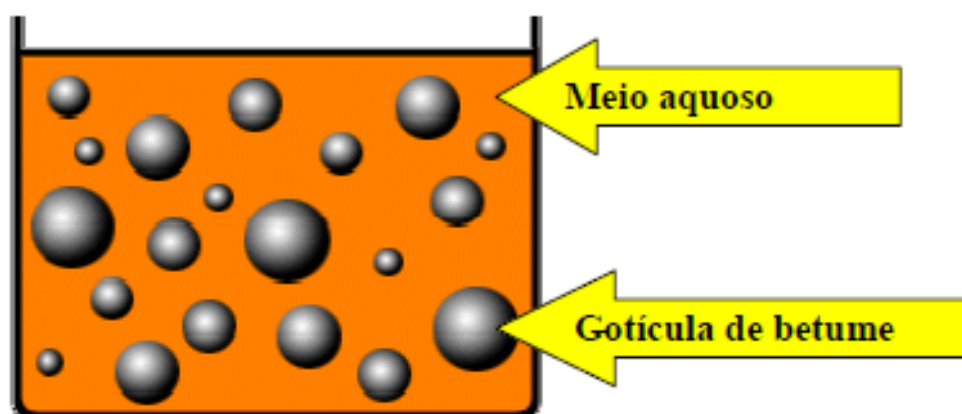


Figura 3.3-Esquema de uma emulsão betuminosa (NUNES, 2008)

O tamanho das gotículas de betume estão entre 0,001 e 0,002 mm, que dependendo do seu tipo de aplicação, a sua concentração estará compreendida entre os 40 e 70 % de betume, sendo que o limite máximo dependerá exclusivamente do volume relativo das duas fases (fase contínua e fase descontínua). Quando esse limite é atingido deixa de existir espaço suficiente para mais gotículas, sem que estas sofram deformação, esse limite está compreendido entre os 70 e os 80% de betume. ( NUNES, 2008) (Read , et al., 2003)

As emulsões betuminosas pertencem a uma categoria particular de emulsões betume-água, sendo que este conjunto não forma uma emulsão por si só, para que isso seja possível é necessário a utilização de um emulsionante de forma a criar uma emulsão e torná-la estável. (Bernucci, et al., 2008). A adição de emulsionante, como se pode observar na figura 3.4, proporciona à emulsão betuminosa estabilidade e facilita a dispersão do betume em água, tendo as moléculas dos emulsionantes duas partes distintas, uma com grande afinidade com o betume e outra com a água. Esta dupla característica evita a coalescência entre os glóbulos

de betume e a emulsão, na interface betume-água. (CEPSA, 2006). O emulsionante reduz a tensão superficial, permitindo assim às gotículas de betume permanecerem em suspensão na água por um determinado tempo, permitindo assim a separação dos glóbulos de betume, pois este processo poderá durar semanas ou até meses, dependendo do tipo de formulação pretendida para a emulsão. (Bernucci, et al., 2008).

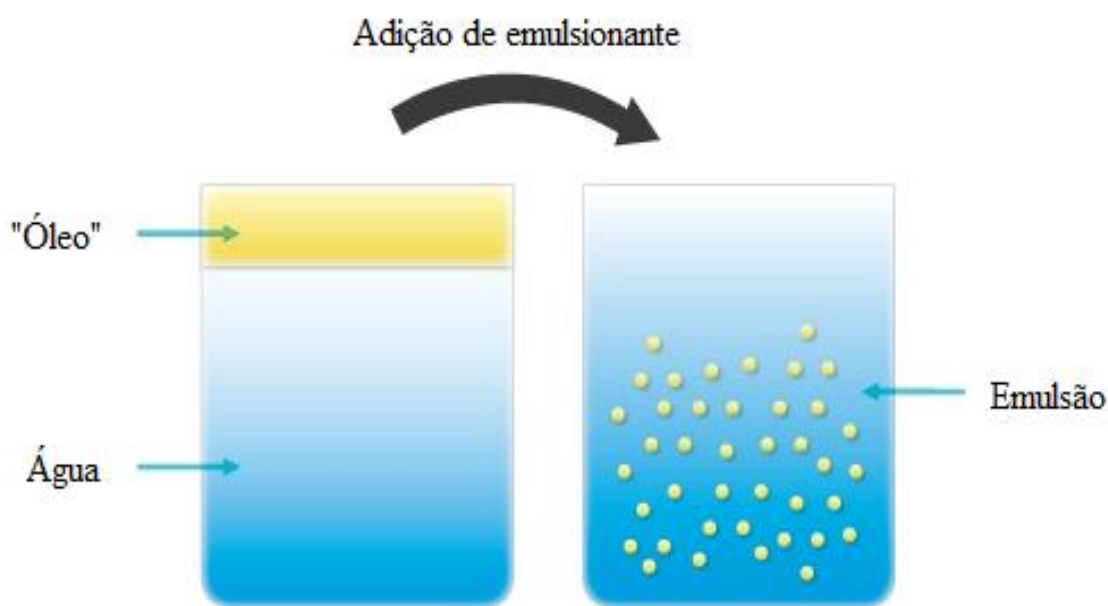


Figura 3.4-Exemplo da adição de um emulsionante (Fonte <http://dkcorporation.tradeindia.com/emulsifier-for-paints-solvents-vegetable-oil-412944.html>)

Os emulsionantes conferem à emulsão certas características como;

- Torna a emulsificação mais fácil, reduzindo a tensão interfacial entre a água e o betume.
- Determina se a emulsão formada é, água em “óleo” ou “óleo” em água.
- Estabiliza a emulsão prevenindo a coalescência das gotículas.
- Determina as características da emulsão, tais como, tempo de rotura e adesão.
- Determina o grupo a que irá pertencer a emulsão.

O emulsionante é o composto mais importante em todas as emulsões água-betume, para que este tenha o efeito desejado terá de ser solúvel em água e ter o equilíbrio necessário entre as

propriedades hidrofílicas<sup>2</sup> e lipofílicas<sup>3</sup>. O emulsionante determinará o “grupo” ao qual a emulsão irá pertencer, isto é, normalmente o emulsionante é constituído por uma cadeia extensa de hidrocarbonetos terminando num grupo funcional aniónico ou catiónico, determinando assim se a emulsão betuminosa será, respetivamente catiónica ou aniónica. (Bernucci, et al., 2008)

A maioria das emulsões betuminosas são produzidas num sistema contínuo usando um moinho coloidal, como podemos observar na figura 3.5. Os componentes, betume e água+emulsionante, são inseridos em separado mas ao mesmo tempo. Dentro do moinho coloidal o betume e o emulsionante são sujeitos a forças intensas, fazendo com que o betume se “desfaça” em pequenas gotículas. (Bernucci, et al., 2008) (Read , et al., 2003)

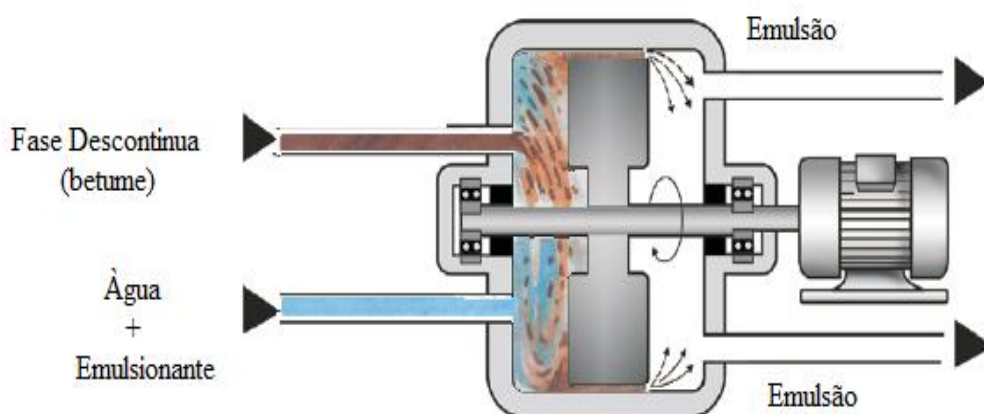


Figura 3.5-Representação esquemática de um moinho coloidal para a produção de emulsões betuminosas. (Fonte Bernucci, et al., 2008)

Na figura 3.6 está representada uma central de emulsões betuminosas com todos os seus componentes, tanques de armazenamento, condutas de transporte, misturador e bombas de fornecimento.

<sup>2</sup> Propriedades hidrofílicas- É a propriedade de um composto se dissolver com a água.

<sup>3</sup> Propriedades Lipofílicas- É a propriedade de um composto se dissolver em substâncias gordurosas.

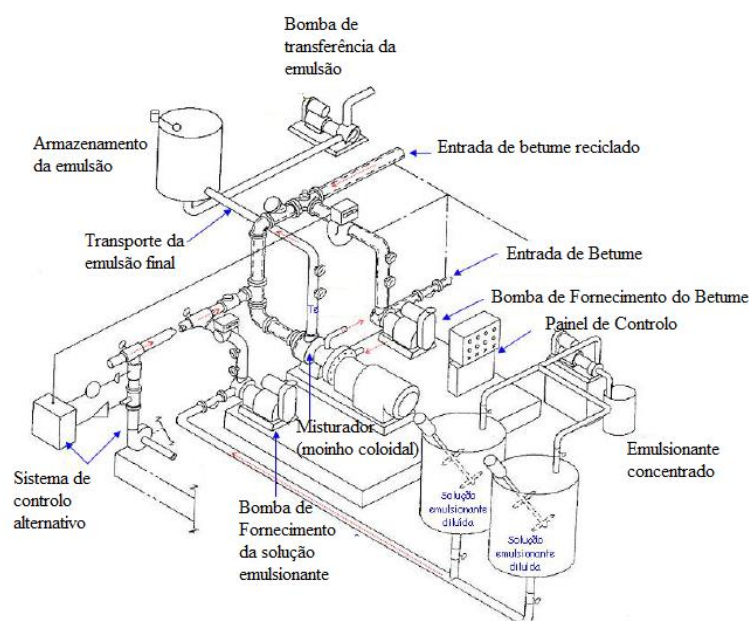


Figura 3.6-Central de fabrico de emulsões betuminosas (Fonte de Kett, 1998)

Como referido anteriormente as emulsões poderão ser divididas em 4 grupos, emulsões catiónicas, aniónicas, não iónicas e argilas estabilizadas, em que as emulsões aniónicas e catiónicas são as mais utilizadas em pavimentos rodoviários.

As emulsões catiónicas são consideradas soluções ácidas contendo um  $\text{pH} < 7$  devido ao uso de um emulsionante de sal amina, nas emulsões aniónicas são usados emulsificantes sulfonatos ou ácidos gordurosos, sendo este último não solúvel em água mas com um produto alcalino, normalmente hidróxido de sódio ou potássio, tornando assim as emulsões aniónicas alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ). (Read, et al., 2003)

Os emulsificantes não iónicos não são produzidos em quantidades significantes sendo normalmente usados para modificar emulsões aniónicas ou catiónicas. (Read, et al., 2003)

### 3.3.2. Rotura de uma emulsão betuminosa

A rotura de uma emulsão betuminosa é a designação dada ao processo de evaporação da água existente na emulsão. É possível verificar o começo deste processo devido à sua mudança de cor, inicialmente esta detém uma cor acastanhada e à medida que vai perdendo água nela existente vai adquirindo uma cor escura. Quando este processo é completamente finalizado a cor da emulsão será preta. (Mohammad, et al., 2012)

Este processo começa quando a emulsão betuminosa entra em contacto com os agregados, fazendo com que a carga negativa/positiva presente nos agregados absorva rapidamente alguns dos iões presentes na emulsão, enfraquecendo a carga na superfície das gotículas, dando assim início ao processo de rotura. É atingido um ponto em que o agregado está completamente coberto por cadeias de hidrocarbonetos, fazendo com que o betume presente na emulsão adira fortemente á superfície de contacto. Na figura 3.7 é representado o processo de rotura de uma emulsão ao entrar em contacto com o agregado (Read , et al., 2003)

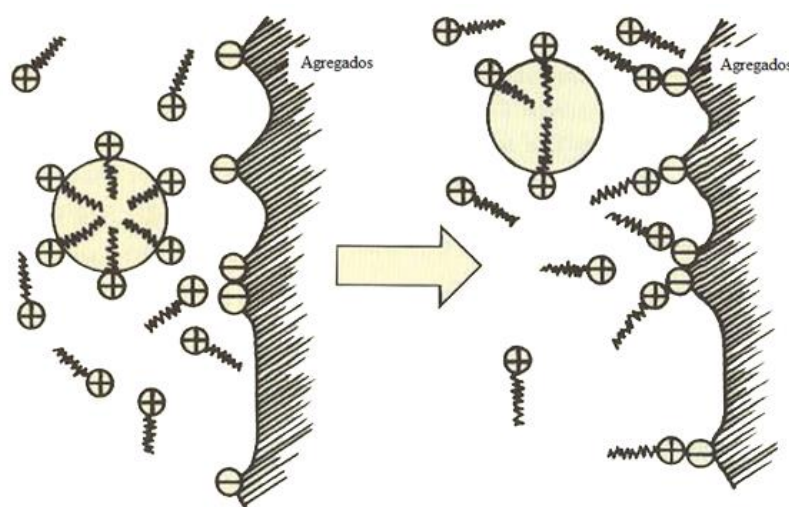


Figura 3.7-Processo de Rotura de uma emulsão betuminosa (Fonte Read , et al., 2003)

A velocidade de rotura da emulsão está subjacente ao tipo de composição química do agente emulsionante e da dosagem da emulsão. Um equilíbrio ideal entre estabilidade e rotura é obtido através da seleção cuidadosa do tipo de emulsionante e a sua concentração. (British Petroleum, 2008)

Segundo Read, et al.(2003), existem seis parâmetros que poderam influênciar as propriedades de rotura de uma emulsão. O betume, a composição da fase aquosa, distribuição da dimensão das partículas de betume, agregados, condições atmosféricas e o uso de agentes de rotura.

- **Betume**

Com o elevado teor em betume as partículas têm maior probabilidade de entrar em contacto umas com as outras, resultando assim num aumento da velocidade de rotura.



- **Fase aquosa**

A velocidade de rotura de uma emulsão betuminosa aumenta quando é reduzida a quantidade de solução acida na emulsão, aumentando o conteúdo de emulsionante ou reduzindo o rácio entre ácido e conteúdo de emulsionante.

- **Distribuição do tamanho das partículas**

Quanto menor a partícula de betume, mais lento será o tempo de rotura da emulsão.

- **Condições atmosféricas**

A evaporação da água é influenciada pelo vento, humidade e temperatura, estando as duas últimas características directamente relacionadas. As baixas temperaturas fazem com que o processo de evaporação da água seja mais demorado, atrasando assim o processo de rotura da emulsão. Com temperaturas elevadas as partículas de betume tornam-se mais móveis tornando o processo de rotura mais rápido e aumentando a probabilidade das partículas coalescerem.

- **Agregados**

A área de contacto dos agregados com a emulsão é influente na velocidade com que a emulsão atinge a rotura. O agregado mais fino tende a acelerar o processo de rotura de uma emulsão devido à sua menor área de contacto.

- **Uso de agentes de rotura**

O uso de um agente de rotura poderá acelerar o processo de rotura de uma emulsão, sendo que este poderá ser aplicado em simultâneo com a emulsão betuminosa ou após a aplicação da emulsão no pavimento. A sua adição e aplicação deverá ser controlada podendo afetar a adesividade da emulsão.

As emulsões betuminosas são divididas consoante o seu tipo de rotura, contendo 3 classes, rotura rápida, média e lenta. (CEPSA, 2006)

### 3.3.3. Classificação das emulsões betuminosas

As emulsões betuminosas catiónicas são classificadas com base na norma europeia EN 13808: 2009, sendo que as emulsões betuminosas aniónicas são classificadas segundo as especificações do LNEC E 128, seguindo assim de perto a norma Americana ASTM D 977.



No quadro 3.2, são apresentadas as siglas para cada posição que definem o tipo de emulsão aniónica, segundo as especificações do LNEC.

Quadro 3.3-Designação para Emulsões betuminosas Aniónicas (Fonte de ASTM D 977.)

Posição	Designação	Denominação
1	E	Emulsão
2	A	Aniónica
3	R M L	Rotura-rápida Rotura-Média Rotura-Lenta
4	1 2 h	Baixa Viscosidade Alta viscosidade Betume Com baixa Penetração

A norma europeia classifica as emulsões catiónicas alfanumericamente podendo conter até 7 posições. No quadro 3.3 pode-se observar as designações para cada uma das possíveis posições, como também as respetivas normas europeias que servem de base para estas designações.

Quadro 3.4-Designação das Emulsões Betuminosas Catiónicas segundo a Norma Europeia EN 13808 (Fonte EN 13808: 2005)

Posição	Designação	Denominação	Em conformidade com as Normas Europeias
1	C	Emulsão Betuminosa Catiónica	EN1430
2 e 3	2-Algarismos	Percentagem de ligante nominal	EN 1428 ou EN 1431
4 ou 4 e 5 ou 4, 5 e 6	B P F	Indicação do tipo de Ligante : Betume de Pavimentação Adição de Polímeros Adição de mais de 2% de Fluxantes	EN 12591 EN 14023
5 ou 6 ou 7	1 a 7	Classe de rotura	EN 13075-1

A título de exemplo, uma emulsão betuminosa “C60BPF6” corresponde a uma emulsão betuminosa catiónica, produzida com um betume contendo polímeros e mais de 2% fluxante,

numa percentagem nominal de 60% de betume residual e com um índice de rotura de classe 6. (InIR, 2009)

A versão anterior classificava as emulsões betuminosas catiónicas recorrendo apenas a 3 posições, seguindo de perto a classificação Americana. Comparando a versão de 1998 com a de 2009 temos como exemplo a seguinte emulsão betuminosa C60B2 (emulsão catiónica produzida com betume de pavimentação com uma percentagem de 60% e com índice de rotura de classe 2), na versão de 1998 (figura 3.8) teríamos para a mesma emulsão o seguinte código, ECR-1 (emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida). (InIR, 2009).

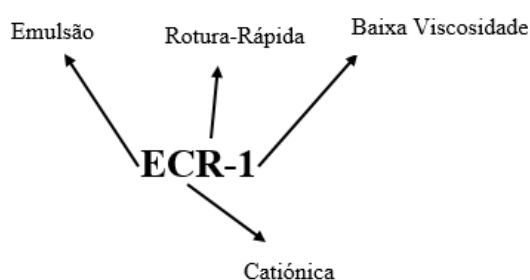


Figura 3.8-Designação de uma emulsão betuminosa na versão CETO\_1998 (Fonte Division of Construction California Department of Transportation, 2009)

### 3.4. Condicionantes da aplicação

Para uma boa aplicação da rega de colagem o primeiro passo passa pela escolha da quantidade adequada a ser aplicada. O CEEP recomenda uma quantidade de emulsão betuminosa a ser usada como rega de colagem de 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Segundo alguns investigadores a dosagem ótima varia entre os 0,12 e 0,40 kg/m<sup>2</sup> dependendo do tipo de superfície onde será aplicada. Um excesso de rega de colagem poderá promover fenómenos de deslizamento na interface das duas camadas enquanto o uso de quantidades insuficientes poderá provocar destacamentos por falta de aderência entre as camadas.

Chen, et al.(2010) comparou seis quantidades diferentes de emulsão betuminosa, 0,06; 0,12; 0,18; 0,24 e 0,3 L/m<sup>2</sup>, concluiu que a taxa de emulsão de 0,12L/m<sup>2</sup>, obteve melhores resultados a nível de resistência de ligação entre duas camadas, como pode-se observar na figura 3.9.

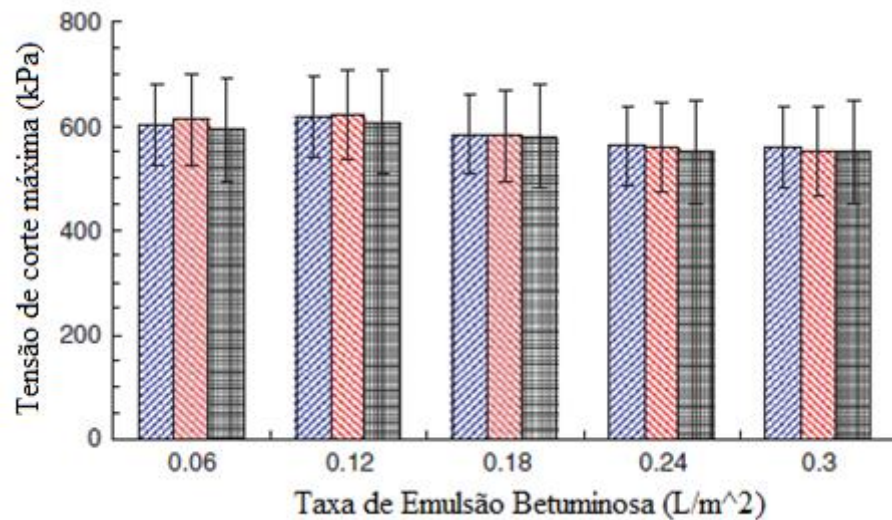
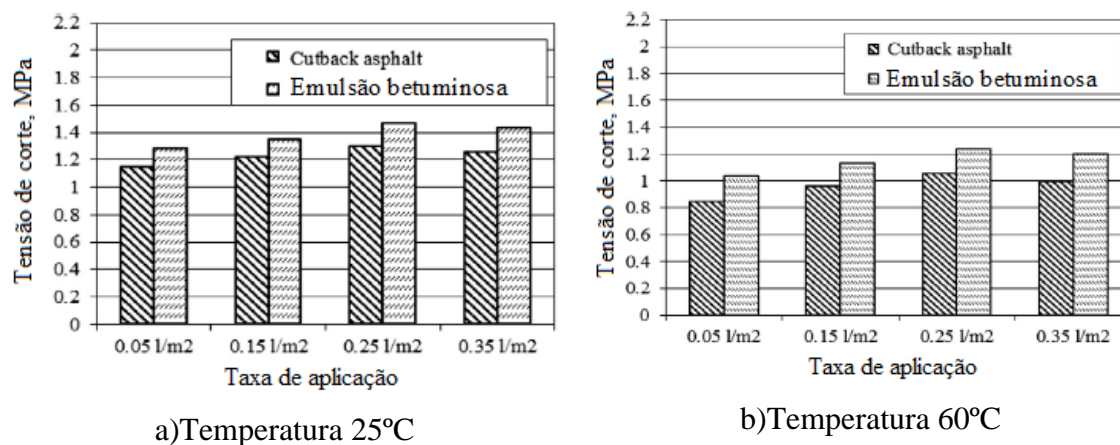


Figura 3.9-Efeito da quantidade de emulsão na resistência ao corte,  
(Fonte Chen, et al., 2010)

Na construção de pavimentos novos é recomendável o uso de dosagens mais baixas devido á pouca absorção que estes têm, prevenindo assim a formação de uma camada excessiva de rega de colagem na superfície do pavimento. No caso de reabilitação de pavimentos é recomendável o uso de dosagens mais elevadas devido à sua facilidade de absorção e para que fique rega de colagem suficiente á superfície para proporcionar uma boa ligação entre camadas. (Mohammad, et al., 2012)

A temperatura e a força normal, como já foi referido anteriormente é um dos fatores mais importantes para proporcionar uma boa ligação entre camadas e segundo os ensaios efetuados por Ghaly, et al.(2013), onde foram comparadas quatro taxas de emulsão betuminosa (0,05 l/m<sup>2</sup>; 0,15 l/m<sup>2</sup>; 0,25 l/m<sup>2</sup>; 0,35 l/m<sup>2</sup>), recorrendo a duas temperaturas distintas, 25°C e 60°C. Na figura 3.10 pode-se observar os resultados obtidos para as diferentes temperaturas e taxas de aplicação utilizadas.



a) Temperatura 25°C  
b) Temperatura 60°C  
Figura 3.10-Efeito da temperatura em diferentes taxas de aplicação.  
(Fonte Ghaly, et al., 2013)

Na figura 3.11 pode-se observar o resultado dos ensaios feitos por Chen, et al., (2010), em que para três combinações de amostras e usando o mesmo tipo de emulsão betuminosa nas três situações, verificou que quanto mais elevada for a temperatura menor será resistência da ligação.

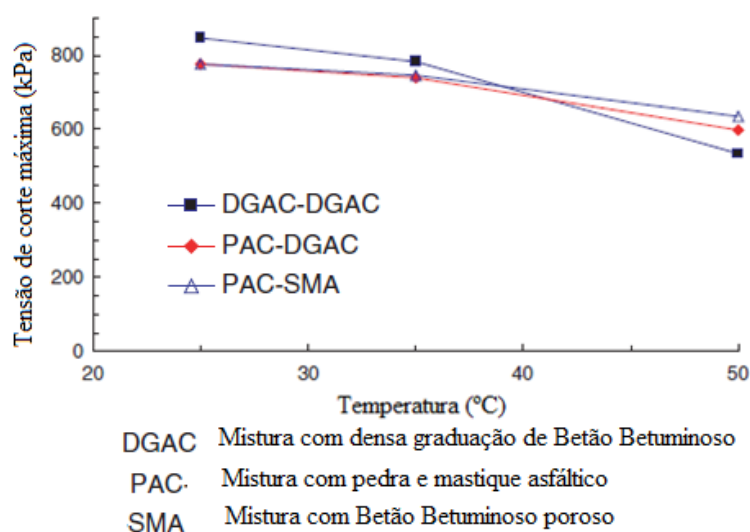


Figura 3.11-Efeito da temperatura na resistência de uma emulsão Betuminosa catiónica de rotura rápida (Fonte Chen, et al., 2010.)

Ghaly, et al.(2013) e Chen, et al.,(2010) concluíram que a resistência de uma emulsão betuminosa está directamente relacionada com as taxas de aplicação, temperatura e viscosidade, sendo que, quando comparado taxas de emulsão entre 0,12 e 0,5l/m² os valores

com maior resistência são obtidos nas quantidades mais baixas e com o aumento da temperatura a resistência na interface diminui.

No momento da aplicação da rega de colagem, a superfície onde será aplicada não deverá ultrapassar os 100°C, tendo como consequência uma rotura prematura da emulsão, sendo que de um modo geral, quanto maior for a temperatura da superfície e do ar na altura da aplicação, mais rápido será o seu processo de rotura. Quando a emulsão é transportada para a obra o recipiente onde estará, deve conservar temperaturas entre os 20°C e 60°C mas nunca ultrapassando os 86°C, correndo o risco da água que se encontra na emulsão evaporar e formar assim uma “pele” de betume á superfície, deixando a emulsão inutilizável. (Mohammad, et al., 2012).

Segundo Mohammad, et al., (2012) uma das principais causas para uma má ligação entre camadas é a má uniformização na aplicação da rega de colagem, a figura 3.12 a) representa uma má unifomização da rega de colagem, enquanto a figura 3.12 b) representa uma boa uniformização. Para uma boa homogeneização da rega de colagem é usado um camião cisterna com um sistema de pulverização na sua traseira como pode-se observar na figura 3.13.



a)



b)

Figura 3.12-a) Má uniformização da rega de colagem b) Boa uniformização da rega de colagem (Mohammad, et al., 2012)



Figura 3.13-Camião cisterna usado para aplicação da rega de colagem (Mohammad, et al., 2012)

Para que seja feita uma aplicação homogênea os borrifadores usados no sistema de pulverização terão de estar correctamente posicionados, como mostra a figura 3.14 onde pode-se observar o correto posicionamento dos mesmos.

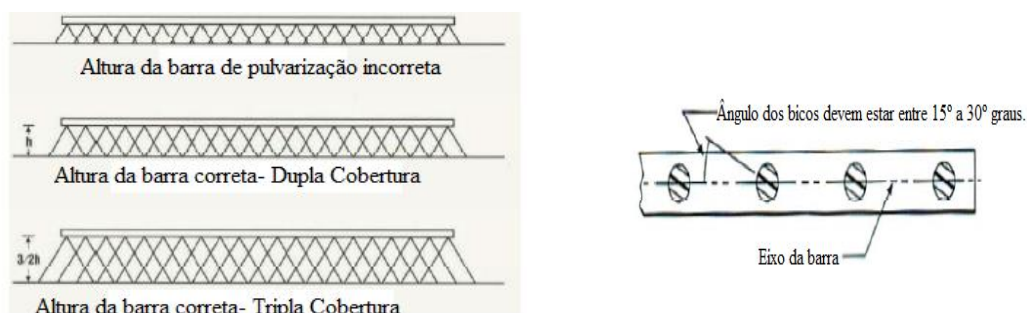


Figura 3.14-Correto posicionamento dos borrifadores colocados nos camiões cisternas.  
(Fonte Division of Construction California Department of Transportation, 2009)

É importante que a rega de colagem seja aplicada uniformemente em todo o pavimento, tanto horizontalmente como longitudinalmente, de modo a obter uma boa ligação entre o pavimento existente e o novo pavimento a ser colocado. (Division of Construction California Department of Transportation, 2009)

Antes da aplicação da rega de colagem no pavimento é necessário que este encontre-se nas condições ideais, ou seja, a superfície deverá estar limpa de material solto e sujidade, sendo

assim necessário proceder-se à limpeza do pavimento recorrendo a jatos de água, vassouras mecânicas, jatos de ar e nos locais de difícil acesso deve ser usado uma vassoura manual. Esta limpeza prévia do local onde irá ser colocada a rega de colagem é fulcral para que o material usado como rega de colagem, não perca algumas das suas propriedades adesivas. (CEEP, 2009)

Se a superfície a tratar for um pavimento betuminoso que se encontre em serviço, deve-se garantir a eliminação de qualquer excesso de emulsão betuminosa que fique após a execução dos trabalhos de fresagem. Após ter decorrido o processo de cura se à superfície for visível uma membrana devido a esse processo, esta deverá ser retirada através de escovagem ou ar comprimido, pois poderá afetar a ligação entre as camadas. (CEPSA, 2006)

Após a aplicação da emulsão betuminosa no pavimento é recomendável esperar que esta entre completamente em rotura, de forma a evitar uma má ligação entre camadas. Como já foi referido anteriormente o processo de rotura é visível pela mudança de cor da emulsão betuminosa. Segundo Chen, et al(2010), há um ligeiro aumento na força de ligação se estendermos o tempo de cura, sendo que uma adequada ligação poderá ser atingida num curto espaço de tempo. A resistência ao corte aumenta ligeiramente com o tempo de cura da emulsão betuminosa até a um certo ponto mantendo-se estável. Na figura 3.15 pode-se visualizar o efeito que o tempo de cura tem na resistência da ligação entre camadas.

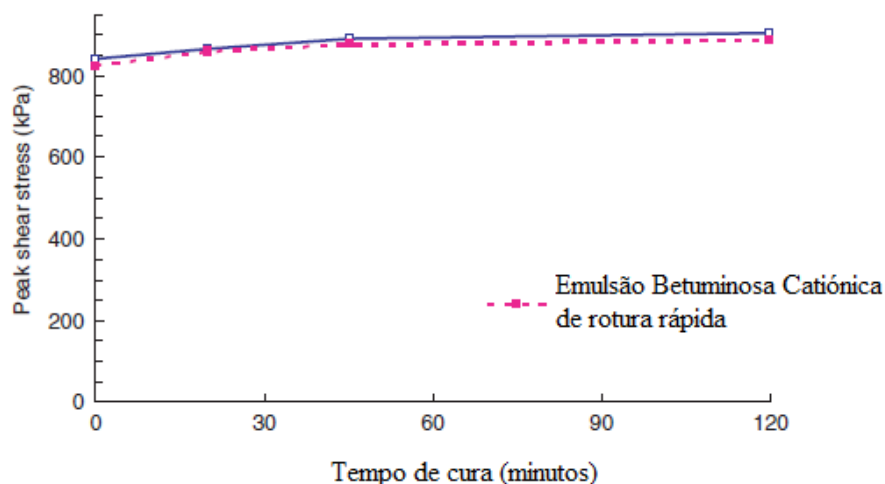


Figura 3.15-Efeito do tempo de cura na resistência ao corte. (Fonte de Chen, et al., 2010)



No quadro 3.4 apresenta-se em forma de resume alguns exemplos de o que fazer e o que não fazer, quando se manuseia uma emulsão betuminosa com a finalidade de utiliza-la como rega de colagem.

Quadro 3.5-Boas práticas na utilização de emulsões betuminosas (Fonte British Petroleum, 2008)

O que fazer	O que <u>não</u> fazer
Armazenar o conteúdo a temperaturas superiores a 0°C e inferiores a 100°C. De preferência entre os 15°C e os 60°C.	Nunca aquecer a emulsão acima dos 86°C, pois a água poderá evaporar formando uma "pele" de betume à superfície.
Armazenar a temperaturas específicas para cada gradiente.	Nunca permitir que uma emulsão congele. Isto faz com que a emulsão entre em rotura.
Verificar a compatibilidade da água que está a ser usada para a diluição da emulsão. Adicionar sempre água à emulsão e não emulsão à água.	Nunca permitir que a superfície onde será aplicada a emulsão, ultrapasse os 100°C. Isto faz com que a emulsão entre em rotura.
Aquecer as bombas de drenagem para evitar a sobrecarga no arranque.	Nunca agitar uma emulsão através de bolhas de ar ou sopro. Isso fará com que se forme espuma excessiva, podendo causar a rotura na emulsão.
Deixar os bujões de drenagem abertos quando estes não estão a ser utilizados.	Nunca usar dispersores apertados, correndo o risco da emulsão ficar presa.
Usar dispersores com aberturas adequadas. O uso de dispersores apertados poderá causar quebras na emulsão e apreensão da bomba de drenagem.	Nunca misturar diferentes tipos de emulsões em tanques de armazenamento.
Proteger as bombas de drenagem, as válvulas e os tubos às temperaturas frias, de forma a assegurar o bom desempenho na aplicação da emulsão.	Nunca aplicar calor extremo para bombear restos de emulsões, fazendo com que o betume depositado endureça, prejudicando a bomba.
Utilizar sistemas de aquecimento moderados com elementos de aquecimento da superfície abaixo dos 85°C.	Não diluir excessivamente emulsões de rotura rápida, pois poderá atrasar o seu processo de rotura ou causando a inutilidade da emulsão.
Regular o misturador do tanque de forma a que o conteúdo tenha ligeiras agitações ou recirculação, de forma a evitar o acumular de partículas de betume sedimentadas.	Não agitar excessivamente ou recircular para períodos muito longos, podendo provocar o colapso da emulsão.
Carregar sempre as emulsões no tanque do camião-cisterna, através de métodos que evitem a formação excessiva de espuma.	



## *Capítulo 4*

---

### Procedimento Experimental



## 4. Procedimento experimental

### 4.1. Enquadramento

O processo experimental foi estruturado para que todos os procedimentos fossem executados de maneira correta e segundo as normas em vigor no fabrico de provetes betuminosos. Nos subcapítulos seguintes é descrito com pormenor cada processo efetuado.

Os diagramas apresentados nas figuras 4.1 e 4.2 representam o procedimento efetuado na fase experimental. A figura 4.1 representa os passos efetuados no fabrico dos provetes betuminosos e as suas características retiradas através dos processos mencionados, enquanto a figura 4.2 representa o processo efetuado nos ensaios ao corte, para determinar a resistência da emulsão betuminosa usada como rega de colagem.

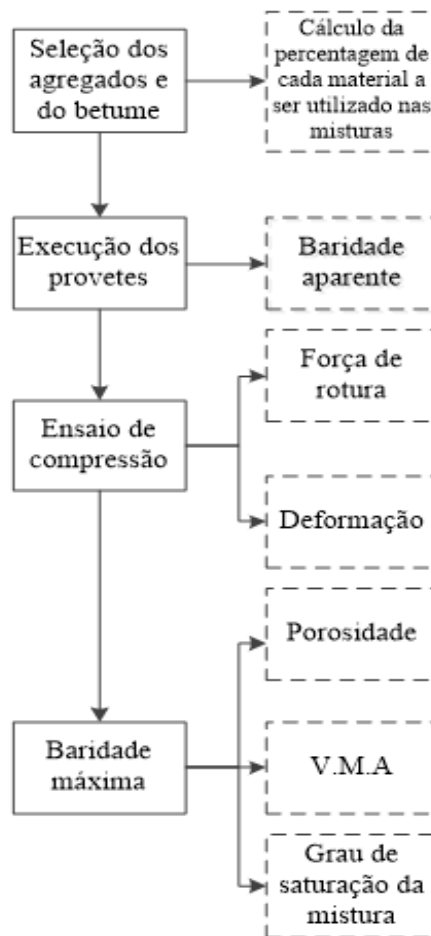


Figura 4.1-Diagrama de procedimentos para o fabrico das misturas

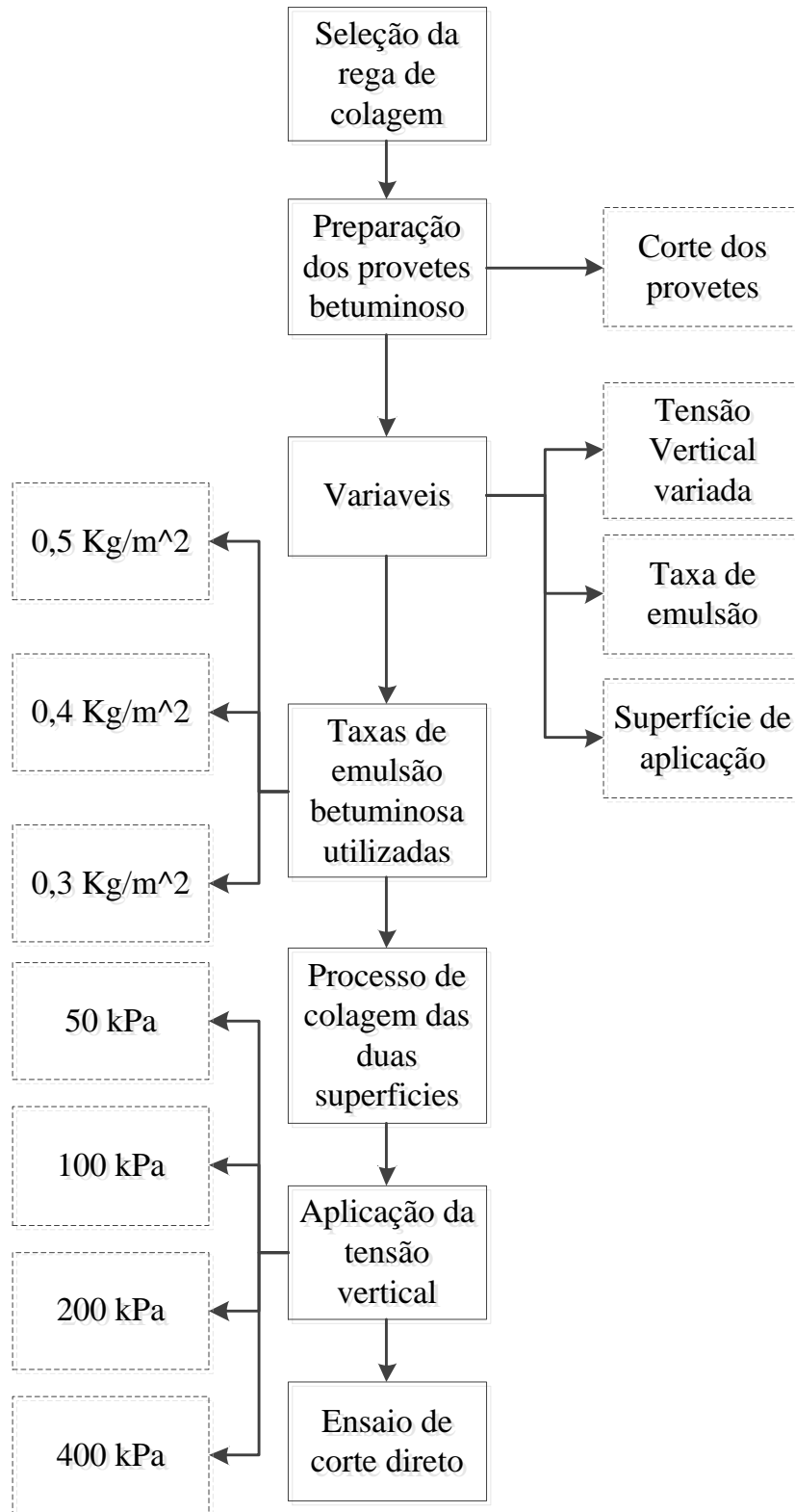


Figura 4.2-Diagrama resumido do procedimento experimental à resistência de ligação entre camadas.

O procedimento experimental é dividido em 5 subcapítulos tendo como fase inicial a preparação e formulação das misturas betuminosas e finalizando com os ensaios de corte direto.

Na preparação e formulação das misturas foram selecionadas as britas, fíler e ligante betuminoso a serem utilizados para a execução de uma camada de desgaste.

Na determinação da densidade aparente é descrito o procedimento efetuado.

No ensaio Marshall é feito uma pequena introdução do objetivo deste ensaio e é descrito o procedimento experimental para a sua execução.

Na determinação da baridade máxima teórica é feito uma descrição do processo experimental efetuado.

Por fim é descrito todo o procedimento efetuado para a determinação da resistência de ligação entre duas camadas betuminosas, utilizando uma emulsão betuminosa como rega de colagem.

#### 4.2.Preparação e formulação das misturas

O primeiro passo para a preparação das misturas betuminosas foi a escolha dos agregados que iriam fazer parte dos provetes a serem preparados. Foram selecionadas duas britas de uso corrente em Portugal Continental, duas britas graníticas com dimensões distintas, Brita 4/8 e Brita 4/12, foi ainda utilizado pó de pedra granítico, uma cal hidráulica como fíler e um betume 35/50.

Após a escolha dos agregados e do fíler foram efetuados os cálculos para a determinação da percentagem de cada material a ser utilizado na mistura betuminosa que se pretendia com 1000 gramas por provete. As percentagens para o material granular foram obtidas com base no fuso granulométrico apresentado no quadro 4.1.

Quadro 4.1-Fuso Granulométrico (CEEP, 2009)

Camada de Desgaste			
Tipo de Mistura		AC 14 Surf (BB)	
Peneiros Série Base+Série 2	Uni.	Rubrica 14.03.2.4.1	
		Percentagem acumulada do material passado	
31,5	mm		-
25			-
20		1,4 D	100%
16			-
14		D	90-100 %
12,5			-
10		(C1)	67-77 %
8			-
6,3			-
4		(o1)	40-52 %
2		2	25-40 %
1			-
0,5		(C2)	11-19 %
0,25			-
0,125		(o2)	6-10 %
0,063		0,063	5-6 %

D - abertura do peneiro superior que pode reter material, em milímetros  
(c1) peneiro característico intermédio, entre D e 2 milímetros  
(o1) peneiro extra opcional entre D e 2 milímetros  
(c2) peneiro característico intermédio, entre 2 e 0,063 milímetros  
(o2) peneiro extra opcional entre 2 e 0,063 milímetros

Na figura 4.3 são apresentadas as curvas granulométricas das duas misturas efetuadas, a mistura MB5% e MB5,5%.

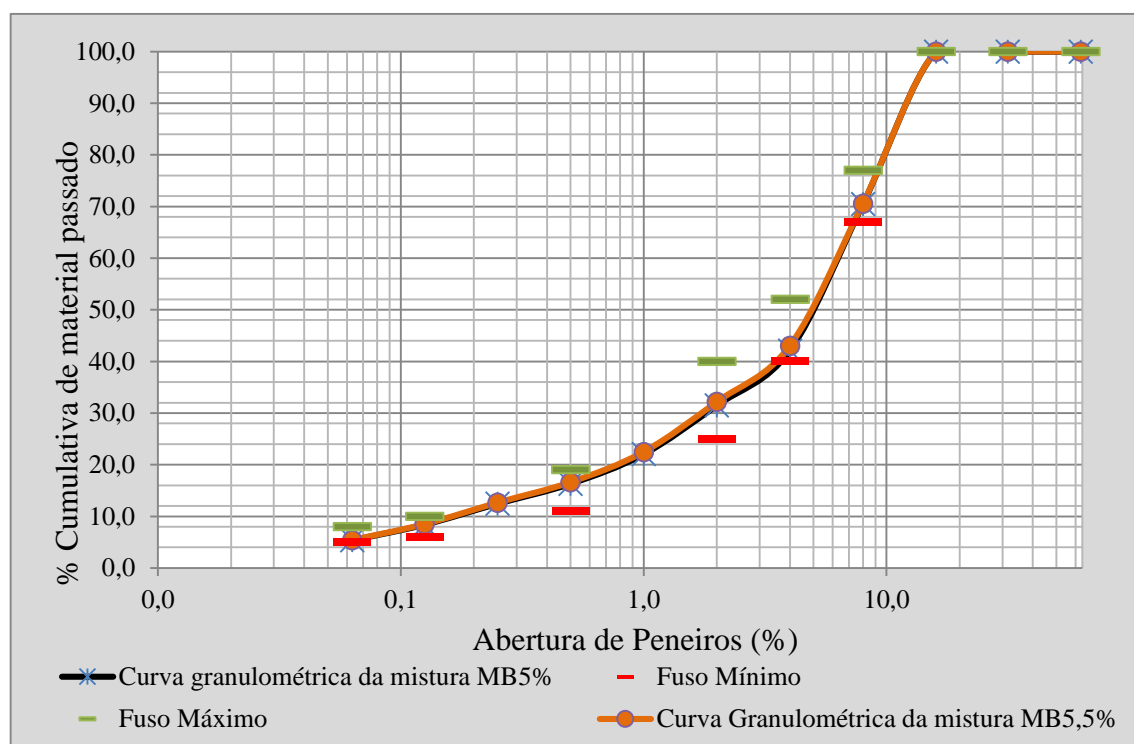


Figura 4.3-Curva Granulométrica para as misturas MB5% e MB5,5% de betume

Após concluir a curva granulométrica e as percentagens de cada material a ser utilizado, foi iniciada a primeira fase do processo de formulação das misturas betuminosas.

Numa primeira fase foi calculada a quantidade de cada material a ser introduzido para a preparação da mistura.

$$M_{\text{Total}}(\%) = M_{\text{agregados}} + M_{\text{Betume}} \quad (4.1)$$

$$M_{\text{Agregado}}(\%) = M_{\text{Total}} - M_{\text{Betume}} \quad (4.2)$$

$$M_1(\%) = M_{\text{agregado}} \times (\%)_{\text{escolhida para cada material}} \quad (4.3)$$

$$M_2(\%) = M_{\text{agregado}} \times (\%)_{\text{escolhida para cada material}} \quad (4.4)$$

$$M_3(\%) = M_{\text{Agregado}} \times (\%)_{\text{escolhida para cada material}} \quad (4.5)$$

$$M_4(\%) = M_{\text{Agregado}} \times (\%)_{\text{escolhida para cada material}} \quad (4.6)$$

$$M_{\text{Betume}}(\%) = M_{\text{Betume}} \times (\%)_{\text{escolhida para cada material}} \quad (4.7)$$

Onde:

- $M_{\text{Total}}$ -Massa total do provete (1000 gramas-100%) (g)
- $M_{\text{Agregados}}$ -Massa total dos agregados (Brita 4/8, Brita 4/12, pó de pedra e fíler) (g)
- $M_1$ -Massa da Brita 4/8 (g)
- $M_2$ -Massa da Brita 4/12 (g)
- $M_3$ -Massa do pó de pedra (g)
- $M_4$ -Massa do Fíler (g)
- $M_{\text{Betume}}$ -Massa total de ligante betuminoso (g)

A equação (4.1) traduz a percentagem total de agregados juntamente com a percentagem de ligante betuminoso pretendido.

A equação (4.2) vem como resultado da equação (4.1) onde a massa total dos agregados será a subtração da massa total da amostra com a massa de ligante betuminoso.

As equações (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7), têm como objetivo calcular a percentagem que cada material deverá ter numa amostra com 1000 gramas.

Antes da pesagem do material, estes foram inseridos numa estufa a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , seguindo a norma EN 12697-35, de forma a retirar a humidade existente nos agregados. Na figura 4.4 pode-se observar o material na estufa. O ligante betuminoso 35/50 foi introduzido na estufa a uma temperatura de  $165^\circ\text{C}$ , como é indicado na norma EN 12697-35.



Figura 4.4-Agregados a secar na estufa a uma temperatura de  $110^\circ\text{C}$

O quadro 4.2 representa as temperaturas de referência para cada classe de betume expostas na norma EN 12697-35:2004.



Quadro 4.2-Referências de temperatura a serem utilizadas para cada classe de betume de pavimentação (Fonte EN 1269-35:2004)

Classe de pavimentação do betume	Temperatura de Referência °C
20/30	180
30/45	175
35/50	165
40/60	155
50/70	150
70/100	145
100/150	140
160/220	135

A próxima fase do procedimento experimental passa por misturar os agregados com o ligante betuminoso, usando a misturadora da foto da figura 4.5 o material fica na misturadora durante um ou mais minutos, até que esta apresente uma consistência homogênea.



Figura 4.5-Misturadora mecânica usada na mistura dos agregados com o ligante betuminoso

No quadro 4.3 apresenta-se o tempo máximo recomendado que a mistura betuminosa deverá permanecer na misturadora segundo a norma EN 1269-35:2004. O recipiente onde

permanecerá a mistura betuminosa deverá estar a uma temperatura de 120°C, como referencia a norma EN 1269-35:2004.

Quadro 4.3- Tempo máximo de referência de mistura do agregado com o ligante betuminoso (Fonte EN 1269-35:2004)

Tipo de Mistura	Ligante	Misturadora	Mistura manual
Agregados com ligante betuminoso	Classe de pavimentação	4 min	5 min
		5 min	Até apresentar uma consistência homogénea
	Modificado	5 min	Até apresentar uma consistência homogénea

Após a mistura apresentar uma consistência homogénea, o seu conteúdo deve ser colocado nos moldes cilíndricos (figura 4.6).



Figura 4.6-Moldes (102 mm e 64 mm) utilizados para compactar a mistura betuminosa.

Uma vez dentro do molde, a mistura é colocada num compactador mecânico representado na figura 4.7. O tempo que leva a mistura a ser inserida no molde e a ser introduzida no compactador não deverá exceder os 4 minutos segundo a norma EN 12697-30:2004. Após o martelo do compactador estar devidamente nivelado foram aplicadas 50 pancadas em cada face do provete betuminoso, como é referido na norma EN 12697-30:2004.

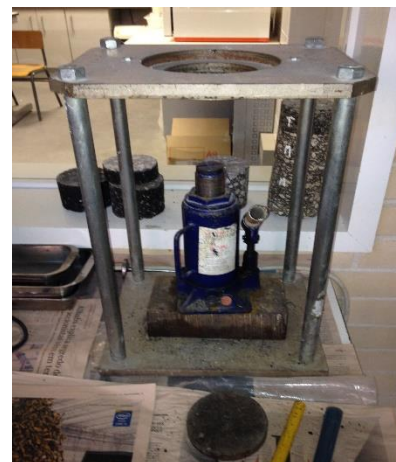


Figura 4.7-Compactador mecânico utilizado para compactar a mistura betuminosa nos moldes.

Ao terminar o ensaio de compactação o provete deverá ser colocado em banho-maria (figura 4.8 a)) a uma temperatura de  $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante pelo menos 2 minutos, de modo a facilitar a extração do provete do molde, essa extração é feita recorrendo à ajuda de um macaco hidráulico como o apresentado na figura 4.8 b). Após retirar a amostra do molde deve-se deixá-la secar por completo, para que a água proveniente do banho-maria seja completamente evaporada.



a)Banho-maria



b)Macaco Hidráulico

Figura 4.8-Banho-maria (a) e macaco hidráulico (b)

Todos os resultados obtidos na determinação das quantidades de cada material a ser adicionado para cada uma das misturas encontra-se no Anexo B.

### 4.3.Determinação da baridade aparente

Para a determinação da baridade aparente foi necessário o uso de uma balança com uma sensibilidade de 0,1g representada na figura 4.9 a) com um sistema hidrostático onde seja possível inserir um cesto de rede como o que é representado na figura 4.9 b) e um recipiente para imersão do provete em água.

Foi utilizado o seguinte procedimento para a determinação da baridade aparente:

- Pesar o provete completamente seco.
- Inserir o provete em banho-maria pelo menos durante 30 minutos.
- Pesar o provete completamente emerso dentro de água
- Limpar a superfície do provete
- Voltar a pesar o provete saturado ao ar livre



a)Balança com sensibilidade de 0,1g.



b)Cesto de rede

Figura 4.9-Aparelhos e Utensílios

Após completar todas as pesagens foram utilizadas as seguintes expressões matemáticas para o cálculo da baridade aparente.

$$V=P_1-P_2 \quad (4.8)$$

$$\rho_{\text{amostra}} = P_3 \div V \quad (4.9)$$

Onde:

- V-volume da amostra (cm<sup>3</sup>)
- P<sub>1</sub>-Peso do provete com superfície seca (g)
- P<sub>2</sub>-Peso do provete em água (g)
- P<sub>3</sub>-Peso do provete (g)
- $\rho_{\text{amostra}}$ -Baridade da amostra (g/cm<sup>3</sup>)

A equação (4.8) é referente ao volume de uma amostra, que por sua vez dá precedência à equação (4.9) que é alusiva à baridade de uma amostra.

Os resultados referentes à baridade aparente encontram-se no Anexo B.

#### 4.4.Ensaio Marshall

O ensaio Marshall trata-se de um teste destrutivo que fornece indicações sobre a resistência de uma mistura betuminosa à compressão, sendo considerado também como um ensaio empírico, não fornecendo qualquer informação sobre propriedades da mistura, mas sim sobre a resistência mecânica do provete ensaiado. Este ensaio apresenta limitações para caracterizar as misturas betuminosas quanto à sua deformação permanente, não reproduzindo as ações que a mistura sofre no pavimento. A principal vantagem que este ensaio possui é a sua simplicidade de utilização. (Gardete, 2006)

Na figura 4.10 pode-se observar a prensa digital para ensaios CBR, Marshall e Triaxial. Na realização deste ensaio foi usado um anel com uma carga máxima de 50 kN.



Figura 4.10-Prensa digital para ensaios CBR, Marshall e Triaxial

O ensaio Marshall segue o seguinte procedimento experimental:

- Inserir a amostra em banho-maria cerca de 40 minutos e não mais de 60 minutos, a uma temperatura de  $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ .
- Retirar a amostra do banho-maria, colocar o provete no estabilómetro, sendo que este deverá estar convenientemente limpo e com o defletómetro montado.
- Aplicar uma força com uma velocidade constante até à rotura do provete. Este ensaio deverá ser executado num período não maior que 40 segundos, após retirado o provete do banho-maria.
- Retirar os valores do defletómetro e do anel de carga no instante da rotura do provete.
- Usar a equação da reta de calibração do anel de 50 kN, para obter o valor da força de rotura em kN.

O ensaio Marshall foi utilizado em 12 provetes, cinco pertencentes à mistura MB5,5% e sete à mistura MB5%.

Os resultados dos ensaios efetuados encontram-se descritos no Anexo B

#### 4.5.Baridade máxima

A baridade máxima, em conjunto com a Baridade aparente são utilizadas para calcular a porosidade de uma amostra compactada e outras propriedades relacionadas com a mistura betuminosa.

Na figura 4.11 pode-se observar uma mistura antes e depois de serem mergulhadas em água, a figura 4.11 a) representa a amostra antes do ensaio sendo que a figura 4.11 b) é após o ensaio.



Figura 4.11-a) Partículas com vazios a serem preenchidos por água b) Partículas com os vazios preenchidos de água (EN 12697-5:2002)

Para a execução deste ensaio foi utilizado o procedimento de pressão volumétrica para os dois tipos de mistura utilizadas.

Começou-se por desagregar a mistura betuminosa, introduzindo o provete na estufa a uma temperatura  $110 \pm 5$  °C, durante 30 minutos, de forma a facilitar a desfragmentação da mistura. Enquanto a mistura encontra-se na estufa procede-se à pesagem do picnómetro vazio e cheio de água, depois de retirar a mistura da estufa procedeu-se à sua desagregação e pesagem. Por fim é feita uma última pesagem com o picnómetro cheio de água e com a amostra. Após todo o processo de pesagem ter terminado começa-se o processo de vácuo, em que este consiste em retirar todo o ar presente entre os espaços vazios da mistura desagregada, de modo a estes ficarem preenchidos por água e não por ar.

Na figura 4.12 observa-se o processo de vácuo, este processo foi demorado devido à falta de uma mesa vibratória de forma a soltar as partículas e libertar o ar entre elas. O procedimento foi executado recorrendo a pancadas na mesa onde se encontrava o picnómetro de forma a soltar as bolhas de ar que se encontravam entre as partículas.

Depois do processo de vácuo ter terminado, voltou-se a pesar-se o conjunto, picnómetro cheio de água e amostra.



Figura 4.12-Picnómetro utilizado no processo de vácuo.

Terminado o procedimento experimental, determinou-se através das equações seguintes a baridade máxima, a porosidade, o teor em volume de betume e o grau de saturação das amostras, MB5% e MB5,5%.

$$V = M_S + M_P - M_T \quad (4.10)$$

$$B_T = M_S \div V \quad (4.11)$$

$$n(\%) = (B_T - B_M) \div B_T \quad (4.12)$$

$$TVB(\%) = (B_M \times P_{be}) \div v_{\text{Betume}} \quad (4.13)$$

$$VMA(\%) = n + TVB \quad (4.14)$$

$$Sb(\%) = TVB \div VMA \quad (4.15)$$

Onde:

- $V$ -volume da amostra ( $\text{cm}^3$ )
- $M_S$ -Massa da amostra seca (g)
- $M_P$ -Massa do picnómetro Cheio de água (g)
- $M_T$ -Massa do picnómetro cheio de água + amostra (g)



- $B_T$ -Baridade máxima teórica ( $\text{g/cm}^3$ )
- N-Porosidade da mistura em percentagem (%)
- TVB-Teor de volume de betume (%)
- VMA-Volume de vazios (%)
- $S_b$ -Grau de saturação (%)
- Pbe-Percentagem de ligante betuminoso na mistura (%)
- $\gamma_{\text{Betume}}$ -Massa volúmica do Betume

O volume (V) da amostra é calculado através da equação (4.10) que por sua vez será usado na equação (4.11) para calcular a baridade ( $B_T$ ) máxima da mistura betuminosa.

A porosidade (n) provém da equação (4.12), em que o objetivo é conhecer a percentagem de vazios na mistura.

A equação (4.13) é referente ao valor de teor de betume (TVB) presente na amostra betuminosa.

A utilização da equação (4.14) dá o valor referente ao volume de vazios (VMA) presente na mistura betuminosa.

As equações (4.13) e (4.14) dão origem à equação (4.15), grau de saturação ( $S_b$ ) de uma amostra.

Todos os resultados das pesagens efetuadas estão em gramas, como indicado na norma EN 12697-5:2002.

Os resultados referentes à baridade máxima são apresentados no Anexo B.

#### 4.6. Resistência da ligação

Para os ensaios de resistência da ligação entre duas camadas betuminosas, foi utilizada uma emulsão betuminosa catiónica de rotura rápida (C60B4) como rega de colagem. A ficha técnica da emulsão usada encontra-se no Anexo A. Para avaliar a resistência da ligação entre camadas foi utilizado o ensaio de corte direto para 12 misturas MB5% e 12 misturas MB5,5%.

Para esta fase experimental foi efetuado o seguinte procedimento:

- Corte de todos os provetes em duas partes distintas.

- Ajustamento da máquina de corte.
- Preparação dos provetes da mistura MB5,5%.
- Limpeza.
- Aplicação da emulsão betuminosa
- Desagregação e compactação de uma das partes dos provetes.
- Medição da temperatura do local do ensaio de corte.
- Execução dos ensaios de corte direto.
- Tratamento de dados.

O primeiro procedimento executado foi dividir as amostras betuminosas em duas partes recorrendo a uma serra elétrica, uma com 2,1 cm de altura e a outra com 2,9 cm de altura, sendo possível observar-se na figura 4.13. Foi adaptado este procedimento devido ao posicionamento do “pescoço de cisne” (figura 4.14), e para que fosse possível proceder ao ensaio de corte direto na zona de ligação entre as duas camadas. Após o corte de todos os provetes, procedeu-se a uma limpeza prévia, de forma a retirar todo o material solto e pó proveniente do corte



Figura 4.13-Provete após ser dividido em duas partes através de uma serra elétrica.



Figura 4.14-Pescoço de cisne existente na caixa de corte

Após o corte dos provetes e limpeza foram executadas duas peças (figura 4.15) com o objetivo de modificar a caixa de corte para o ensaio pretendido, isto porque o dispositivo usado para os ensaios de corte não estava preparado para receber o tipo de provetes utilizados.

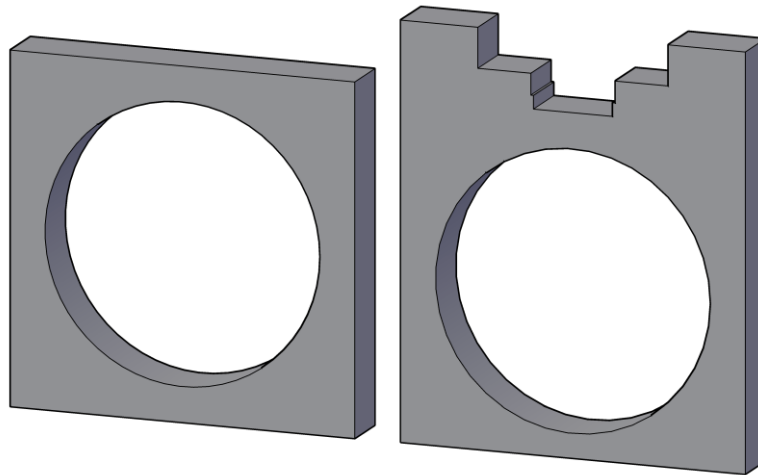


Figura 4.15-Peças fabricadas

O próximo passo no processo experimental passou pela utilização de uma escova de palha-de-aço (figura 4.16 b)) nas amostras MB5,5%, de forma a retirar a superfície do provete onde iria ser aplicada a rega de colagem uma pequena percentagem de betume, para que este se assimilasse à de um pavimento real (figura 4.16 a)). Foi realizado este tratamento de forma a comparar qual seria a quantidade de emulsão betuminosa usada como rega de colagem, que teria os melhores resultados na ligação entre duas camadas.



a)



b)

Figura 4. 16-a) Superfície após raspagem. b) Escova utilizada para a raspagem.

Após o processo de “raspagem” dos provetes MB5,5% foi executada uma limpeza em todos os provetes que iriam ser utilizados nos ensaios ao corte, esta limpeza feita antes da aplicação da emulsão nos provetes tem um grau de importância elevado, isto porque, uma superfície onde irá ser colocada a emulsão betuminosa deverá estar livre de pó e partículas soltas, sendo que estas intervêm negativamente na ligação entre camadas. No processo de limpeza foi utilizado um jato de ar comprimido e uma escova de plástico para que não fosse deixado rezidos de fibras na superfície do provete.

Terminado o processo de limpeza foi aplicada a emulsão betuminosa nas parcelas mais pequena, recorrendo a um pincel (figura 4.17 a)) para que o espalhamento fosse uniforme em toda a superfície de contacto, como é possível observar-se na figura 4.17 b).



a)



b)

Figura 4.17-a) Aplicação da rega de colagem b) Resultado final da aplicação

Após a aplicação da emulsão betuminosa, foi necessário um tempo de espera para que a emulsão entrasse em rotura. No quadro 4.4 estão indicados os tempos médios de espera para as três quantidades de aplicação.

Quadro 4.4-Tempo de rotura médio da emulsão betuminosa para as diferentes taxas aplicadas.

Taxa de Aplicação	Tempo médio de espera
0,5 kg/m <sup>2</sup>	2 Horas
0,4 kg/m <sup>2</sup>	1 Hora e 40 minutos
0,3 kg/m <sup>2</sup>	1 Hora e 35 minutos

Antes que o processo de rotura da emulsão fica-se finalizado foi iniciado o processo de desagregação, as metades maiores dos provetes foram introduzidas na estufa a uma temperatura de 165°C durante 30 minutos. Ao fim desses 30 minutos foram retiradas da estufa, desagregadas e colocadas de novo na estufa durante 15 minutos. Foi utilizada a temperatura de referência quando utilizado um betume 35/50, seguindo a norma EN 12697-35:2004. Foi optado por um tempo de 30 minutos para que a amostra ficasse suficientemente “mole” e de fácil desagregação. Voltou-se a inserir a amostra na estufa para que esta mantivesse uma temperatura elevada para quando fosse inserida no molde juntamente com a metade que continha a rega de colagem.

Terminado todo o processo de desagregação, as misturas foram inseridas no molde juntamente com a metade que continha a emulsão betuminosa já com o processo de rotura completo, de seguida foram compactadas recorrendo ao compactador mecânico. Foram utilizadas 50 pancadas só de um lado, sendo que um dos lados a amostra já se encontrava compactada. Foram utilizadas 50 pancadas para que a amostra ficasse bem compactada e ao mesmo tempo foi seguido os critérios da norma EN 12697-30:2004. As amostras permaneceram no mínimo 24 horas em repouso antes de serem ensaiadas ao corte direto. Foi optado por este tempo mínimo de espera para que a amostra arrefecesse e para que os ensaios de corte fossem feitos à mesma hora de forma a poder ter um controlo sobre a temperatura durante o ensaio ao corte.

Antes de iniciar o ensaio de corte foi medida a temperatura da sala, para que todos os ensaios fossem executados dentro do intervalo de temperatura proposto. Como foi referido anteriormente a temperatura altera a resistência da ligação entre camadas podendo ser

observado na figura 4.18 onde temos o efeito da temperatura vs coesão entre camadas. Os ensaios foram executados a uma temperatura entre os 13°C e os 16°C.

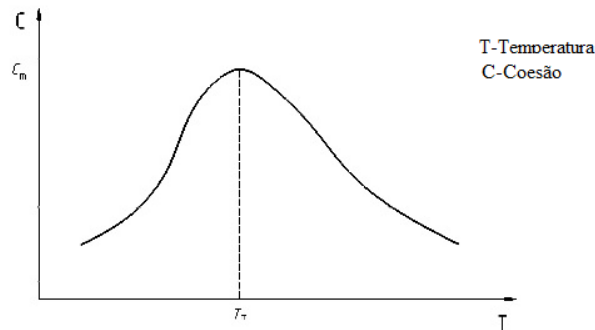


Figura 4.18-Gráfico representativo da coesão vs temperatura

No ensaio de corte direto foram usados quatro tensões verticais distintas, 50 kPa, 100kPa, 200kPa e 400kPa. Para cada uma das forças normais aplicadas foram testados seis provetes, 3 provetes MB5,0% e 3 MB5,5%, para cada um destes três provetes foi utilizada uma taxa de emulsão diferente, sendo essas, 0,5kg/m<sup>2</sup>, 0,4kg/m<sup>2</sup> e 0,3kg/m<sup>2</sup>.

O dispositivo de corte direto (figura 4.19) utilizado neste ensaio é igual ao utilizado nos ensaios de corte direto na mecânica dos solos de forma a conhecer a resistência de corte dos solos. Uma carga vertical constante é aplicado à amostra, enquanto a caixa de corte é deslocada a uma velocidade constante de 1,0 mm/min, transferindo a força de corte para a interface das duas camadas, sendo a força de corte aplicada no plano horizontal. Durante o ensaio foram lidos os valores do deslocamento horizontal dado pelo defletômetro da caixa de corte, o deslocamento registado pelo anel de carga de 10kN e o deslocamento vertical. Os valores foram retirados de 15 em 15 segundos enquanto era decorrido o ensaio.

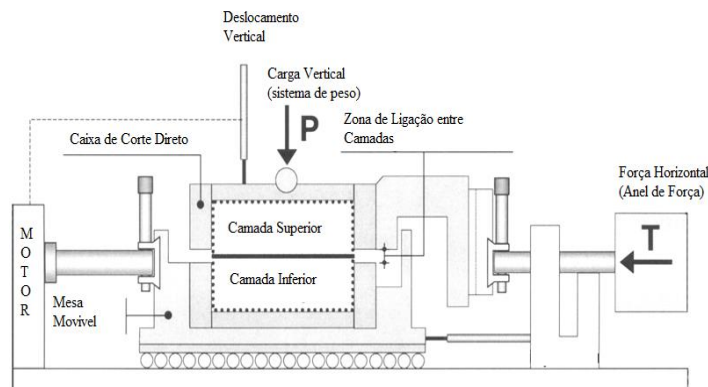


Figura 4.19-Mecanismo de Corte direto (Fonte Chen, et al., 2010)

Na figura 4.20 pode observar-se os provetes antes e depois do ensaio ao corte direto, a figura 4.20 b) mostra o provete antes do ensaio e a figura 4.20 a) mostra o provete após o ensaio de corte direto.



a)



b)

Figura 4.20-a) Provete após o ensaio de corte direto b) provete antes do ensaio ao corte direto

Após serem concluídos todos os ensaios foi feito um tratamento de dados aos valores retirados durante o ensaio de corte direto. No tratamento de dados foram usadas as seguintes equações:

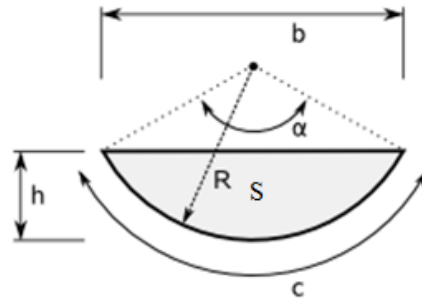
$$kN = 3,9299 \times x + 0,0319 \quad (4.16)$$

$$\Delta l = (D_f - D_i) \times 0,01 \quad (4.17)$$

$$\varepsilon = \frac{(h \times 0,01)}{\varnothing} \quad (4.18)$$

$$\zeta = \left( \frac{kN \times 1000}{\text{Area Final}} \right) \times 1000 \quad (4.19)$$

$$\alpha = 2 \times \left( 90 + \sin^{-1} \left( \frac{h-R}{R} \right) \right) \quad (4.20)$$



$$b = R \times \sin \alpha \quad (4.21)$$

$$S = \left[ \frac{h}{(6 \times b)} \right] \times (3 \times h^2 + 4 \times b^2) \quad (4.22)$$

$$\text{Área}_{\text{Final}} = \pi \times R^2 - \left[ \frac{h}{6 \times (R \times \sin \alpha)} \right] \times (3 \times h^2 + 4 \times (R \times \sin \alpha)^2) \quad (4.23)$$

Onde:

- x-Deslocamento (mm)
- $\Delta l$ -Variação do deslocamento vertical (mm)
- $\varepsilon$ -Deformação horizontal
- $\zeta$ -Tensão (kPa)
- $\alpha$ -Ângulo (graus)
- $\varnothing$ -Diâmetro (mm)
- $D_f$ -Deslocamento final (mm)
- $D_i$ -Deslocamento inicial (mm)
- h-Deslocamento horizontal (mm)
- b-Distância entre extremidades (mm)
- S-Área de deslocamento (mm<sup>2</sup>)
- R-Raio (mm)

A utilização da equação (4.16) converte o deslocamento (x) registado no defletómetro do anel de força 10 kN na força que está a ser aplicada.



A equação (4.17) expressa o deslocamento horizontal (h) durante o ensaio, sendo que a equação (4.18) traduz a relação entre o deslocamento horizontal e o diâmetro do provete.

A expressão (4.19) representa a força que está a ser aplicada numa determinada área. Sendo que as equações (4.20), (4.21), (4.22) e (4.23) são usadas para calcular a área onde está a ser aplicada a força.

Os resultados dos ensaios encontram-se no Anexo C, onde são apresentadas as características de cada provete e os resultados de cada ensaio efetuado.

#### 4.7. Especificações técnicas

As referências técnicas consultadas para a formulação e formação dos provetes de betume foram:

- EN 12591:2000: Bitumen and bituminous binder- Specifications for paving grade bitumens
- Caderno de Encargos Tipo Obra-14.03 Pavimentação, Características dos materiais.
- EN 12594:2007: Bitumen and bituminous binders- Preparation of test samples
- LNEC E 80-1997- Betumes e ligantes Betuminosos; Betumes de Pavimentação
- LNEC E 267- 1973– Misturas Betuminosas; Determinação da Densidade Aparente
- EN 12697:2004- Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt
  - Part: 35- Laboratory mixing
  - Part: 30- Specimen preparation by impact compactor
  - Part: 24- Resistance to fatigue
  - Part: 34- Marshall test
  - Part: 6- Determination of bulk density of bituminous specimens
  - Part: 5- Determination of the maximum density
- NP- 142: 1968- Misturas betuminosas; Ensaio de compressão Marshall

As referências técnicas consultadas para a aplicação da rega de colagem (Emulsões Betuminosas):

- EN 1428- Bitumen and bituminous binders- Determination of water content in bitumen emulsion- Azeotropic distillation method
- EN 1430- Bitumen and bituminous binders- Determination of particle polarity of bitumen emulsion

- EN 12847- Bitumen and bituminous binders- Determination of setting tendency of bitumen emulsion
- EN 12846- Bitumen and bituminous binders- Determination of efflux time of bitumen emulsion by the efflux viscometer
- EN 13808- Bitumen and bituminous binders- Framework for specifying cationic bituminous emulsion
- EN 13075-Bitumen and bituminous binders- Determination of breaking behavior
  - Part 1- Determination of breaking value of cationic bitumen emulsions, mineral filler method
  - Part 2- Determination of fines mixing time of cationic bitumen emulsion

## *Capítulo 5*

---

### Apresentação e Discussão dos Resultados



## 5. Apresentação e discussão dos resultados

### 5.1. Enquadramento

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos nos ensaios de corte direto realizados em laboratório, assim como a sua análise crítica, discussão e conclusão retiradas.

São apresentados os resultados referentes á mistura MB5% para as diferentes tensões e respectivas taxas de emulsão, posteriormente é apresentado o valor de resistência das três taxas de emulsão utilizadas para cada uma das tensões verticais exercidas. É usada a mesma metodologia de apresentação de resultados para a mistura MB5,5%.

O comportamento do provete ao ensaio de corte direto irá ser composto por três fases, a primeira terá um comportamento linear até quase atingir o seu pico máximo, após atingir a sua resistência máxima irá existir uma quebra acentuada na resistência do provete entrando assim na fase 3 chamada de zona residual, em que o deslocamento horizontal ainda acontece mas a resistência ao corte entra numa fase em que os valores manterão uma tendência constante.

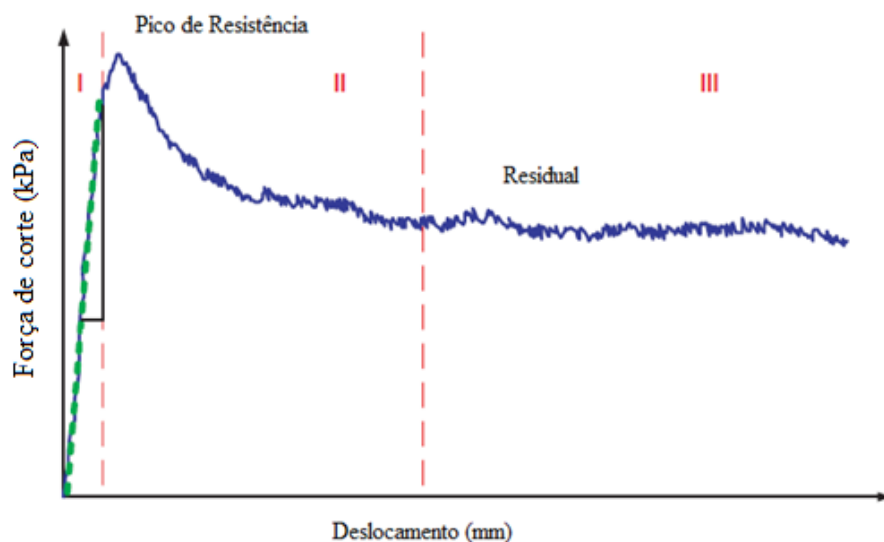


Figura 5.1-Comportamento esperado nos ensaios de corte (Fonte Chen, et al., 2010)

Na figura 5.2 é representado o gráfico com o comportamento dos provetes ao ensaio de corte direto, para a mistura MB5% com uma taxa de emulsão betuminosa de 0,5kg/m<sup>2</sup> e para todas as tensões verticais aplicadas.

Este gráfico é apresentado a título de exemplo, de forma a mostrar o comportamento apresentado pelos provetes nos ensaios de corte direto. No Anexo C são apresentados todos os ensaios efetuados como o comportamento de cada provete ao ensaio de corte e a sua resistência máxima.

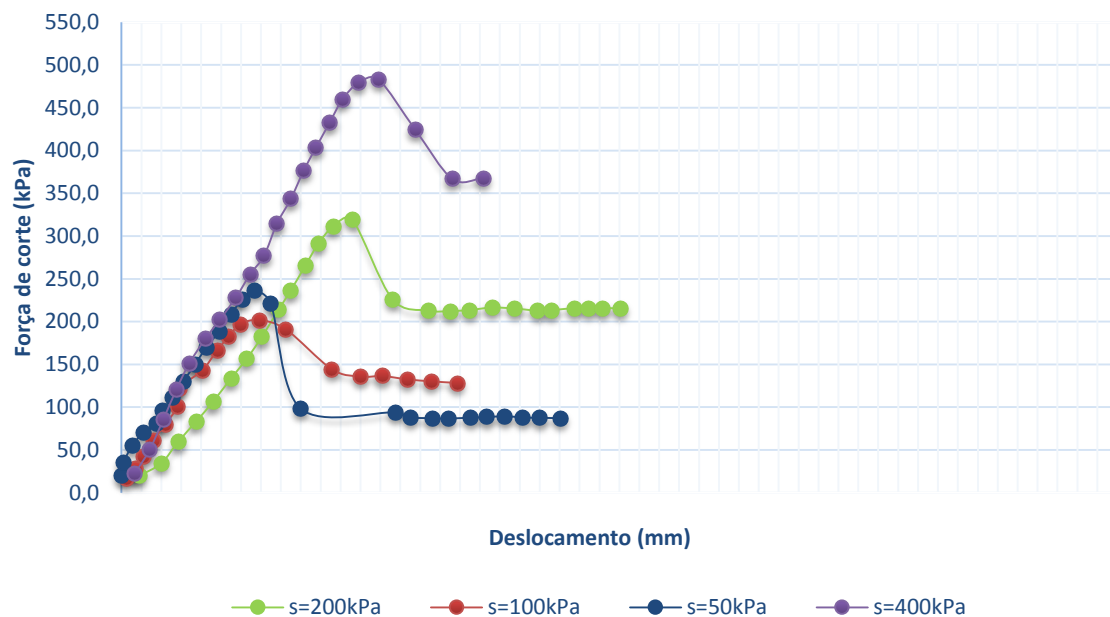


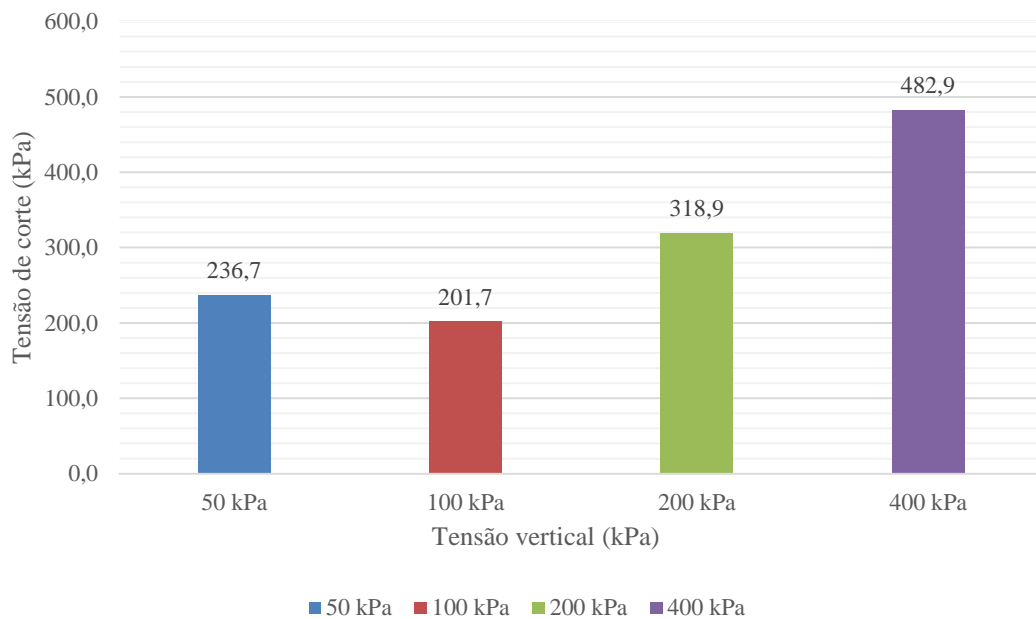
Figura 5.2-Comportamento dos provetes MB5% nos ensaios de corte direto para uma taxa de emulsão de 0,5 kg/m<sup>2</sup>

Os valores apresentados foram o resultado dos ensaios efetuados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

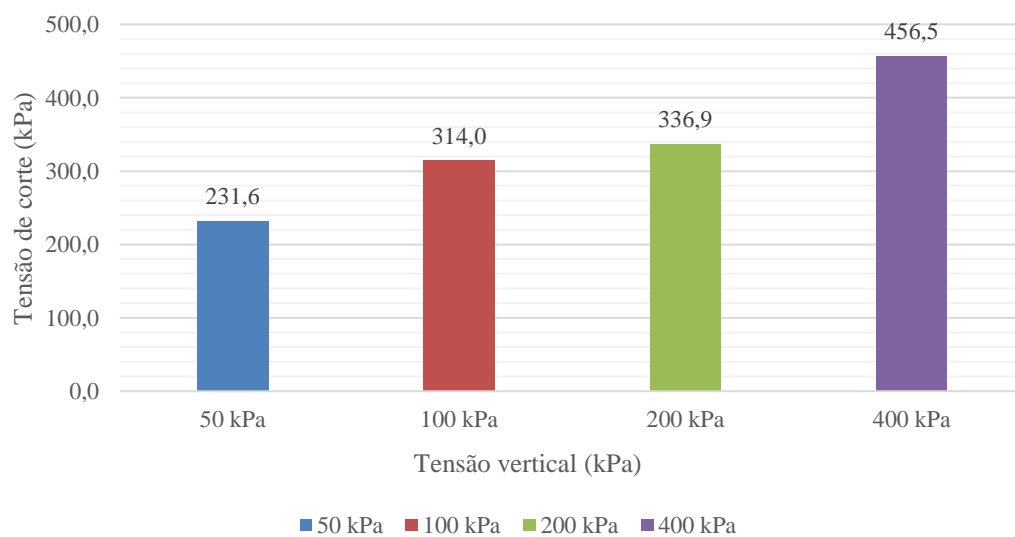
## 5.2. Resultados

### 5.2.1. Mistura MB5%

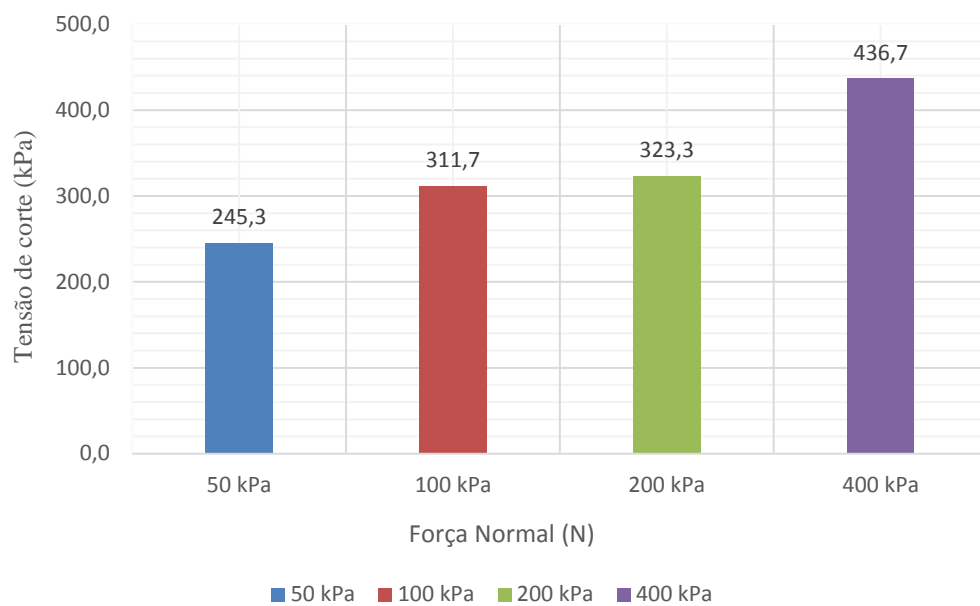
A figura 5.3 apresenta os gráficos com os valores de resistência máxima obtidos nos ensaios de corte direto para as diferentes taxas de emulsão e respectivos carregamentos verticais, podendo verificar-se a evolução da resistência quando é aumentada a tensão vertical aplicada nos provetes.



#### a) Taxa de emulsão betuminosa de 0,5kg/m<sup>2</sup>



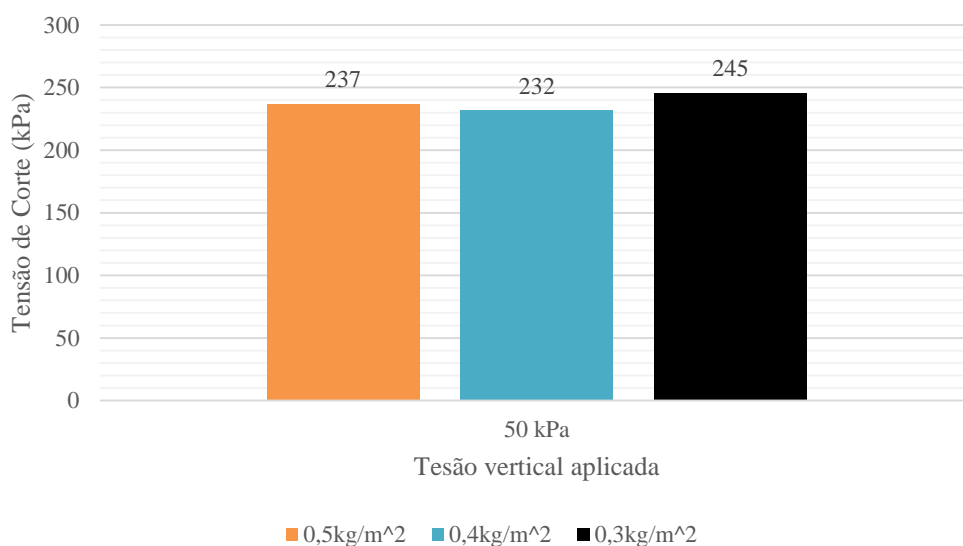
#### b) Taxa de emulsão betuminosa de 0,4kg/m<sup>2</sup>



c) Taxa de emulsão betuminosa de 0,3kg/m<sup>2</sup>

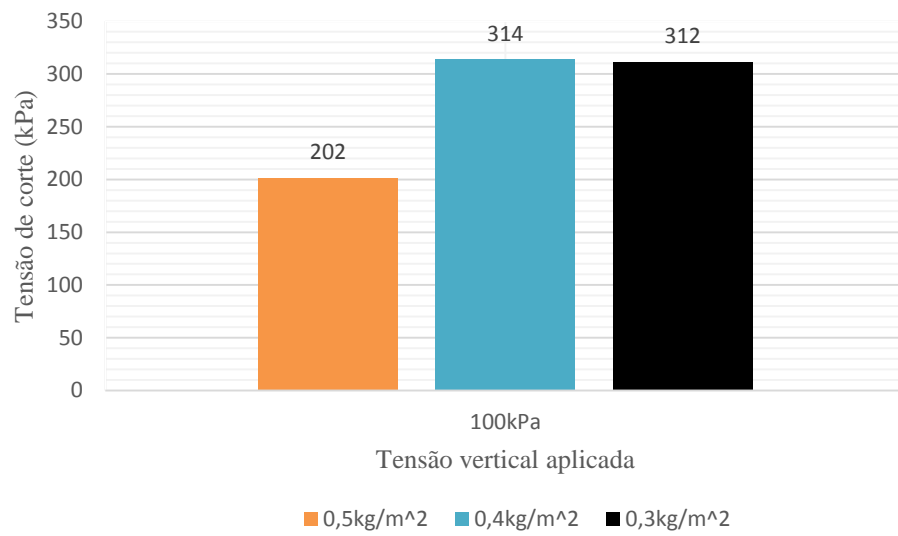
Figura 5.3-Comparação da resistência de ligação para cada tensão vertical aplicada nas diferentes taxas de emulsão utilizadas para a mistura MB5%

Na figura 5.4 apresenta-se a comparação da resistência de ligação entre as três taxas de emulsão utilizadas para cada uma das tensões verticais aplicadas.

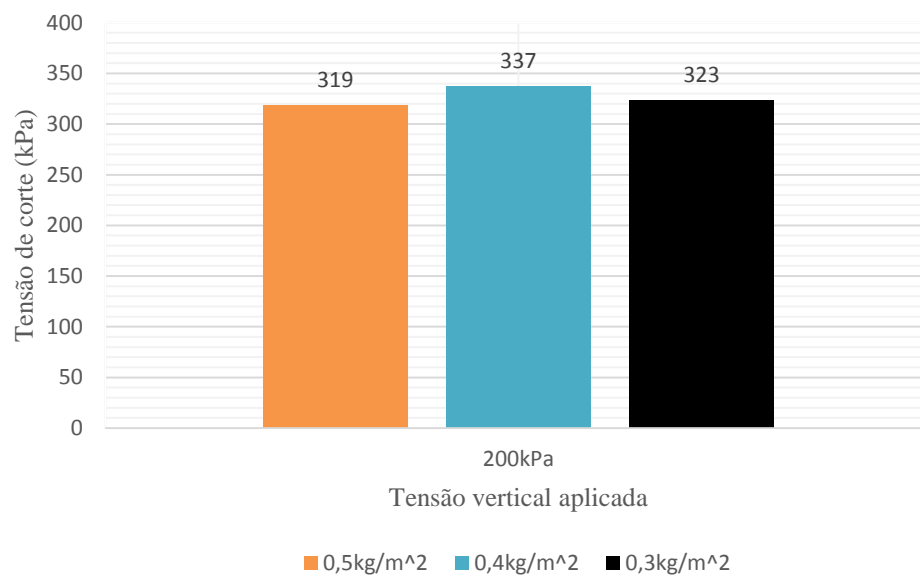


a) Tensão vertical de 50 kPa

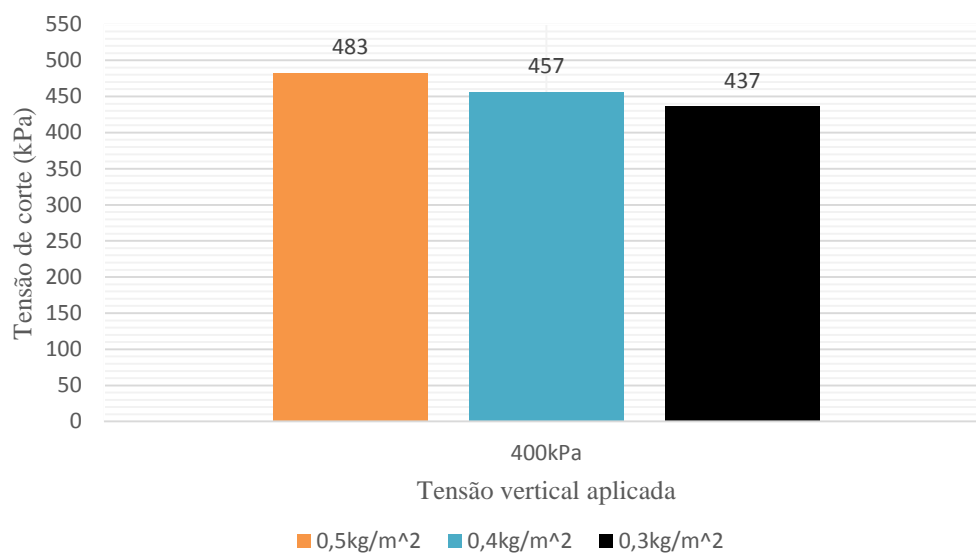




b)Tensão vertical de 100 kPa



c)Tensão vertical de 200 kPa

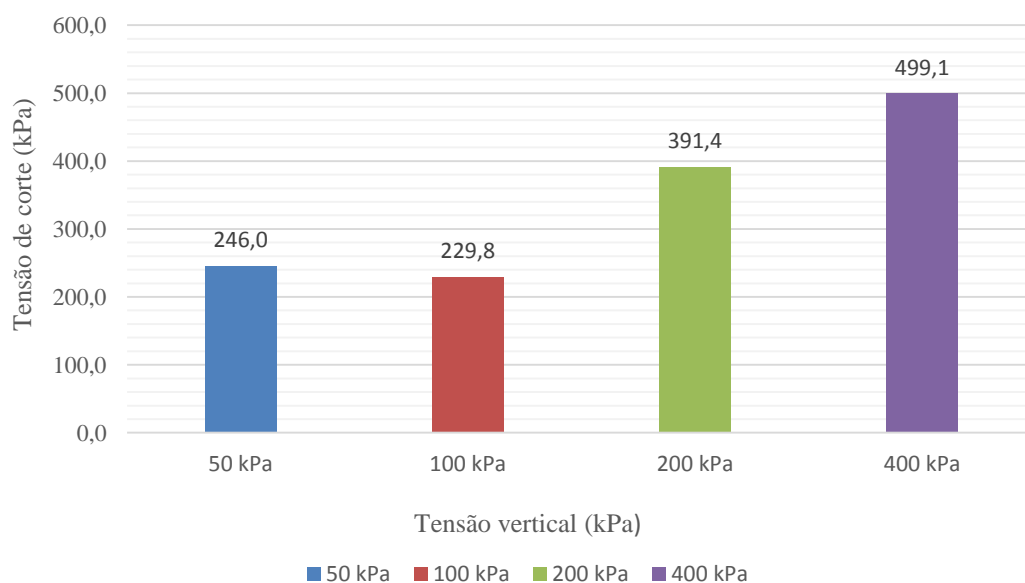


d)Tensão Vertical de 400 kPa

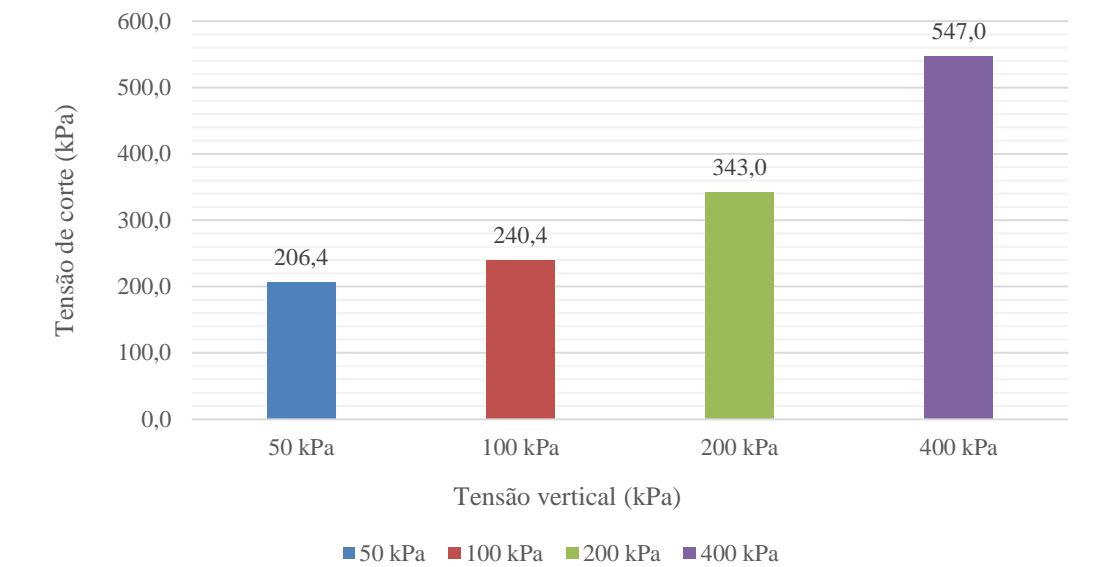
Figura 5.4-Comparação da resistência de ligação entre as três taxas de emulsão utilizadas para iguais tensões verticais.

5.2.2.Mistura MB5,5%

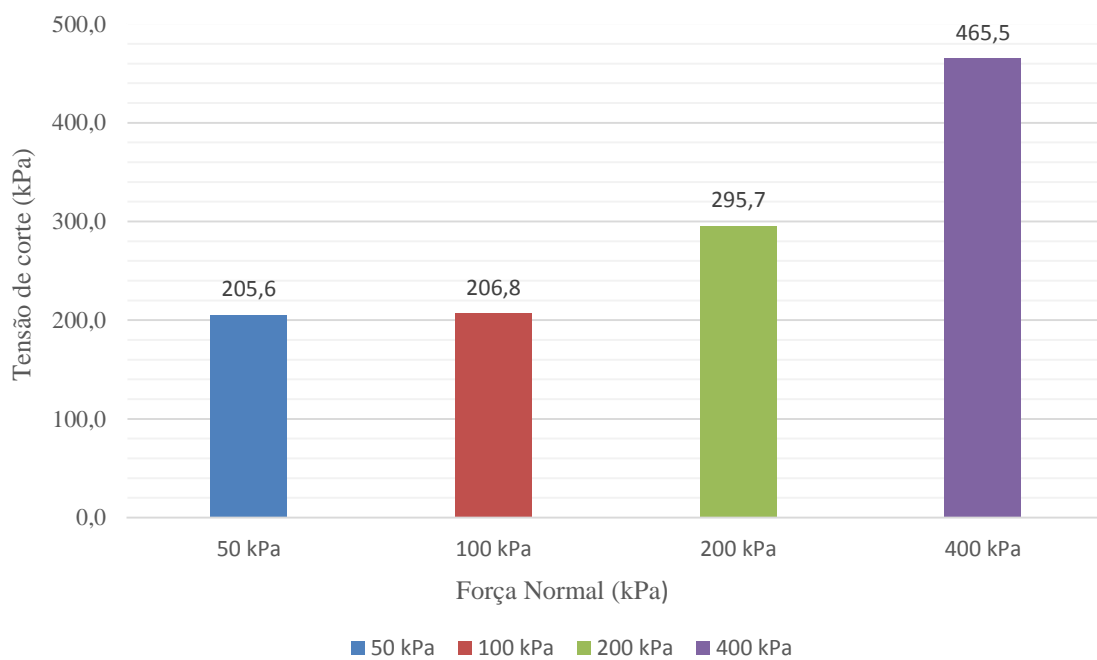
Na figura 5.5 pode-se verificar a evolução da resistência ao corte em função da tensão vertical e as diferentes taxas de aplicação.



a)Taxa de emulsão betuminosa de 0,5kg/m²



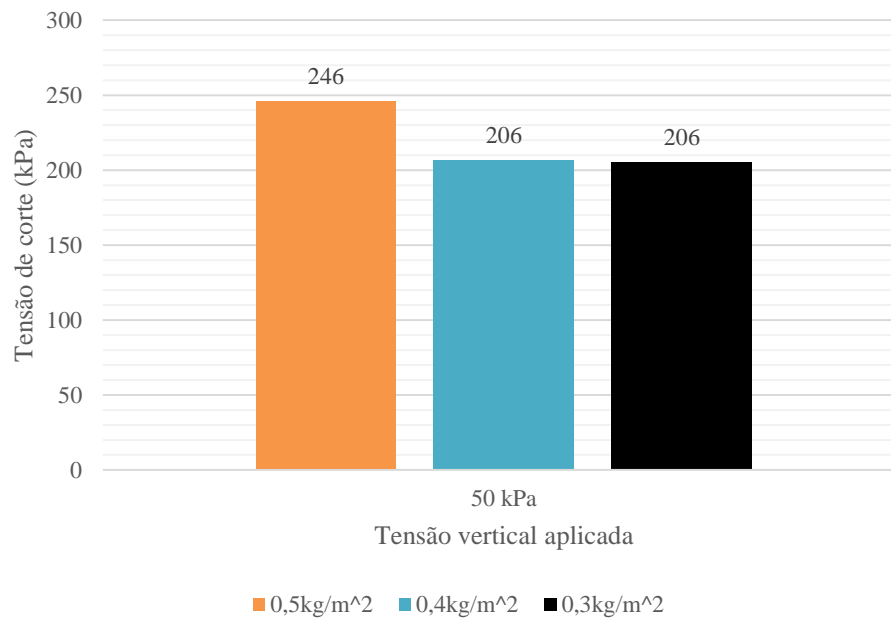
b) Taxa de emulsão betuminosa de 0,4kg/m<sup>2</sup>



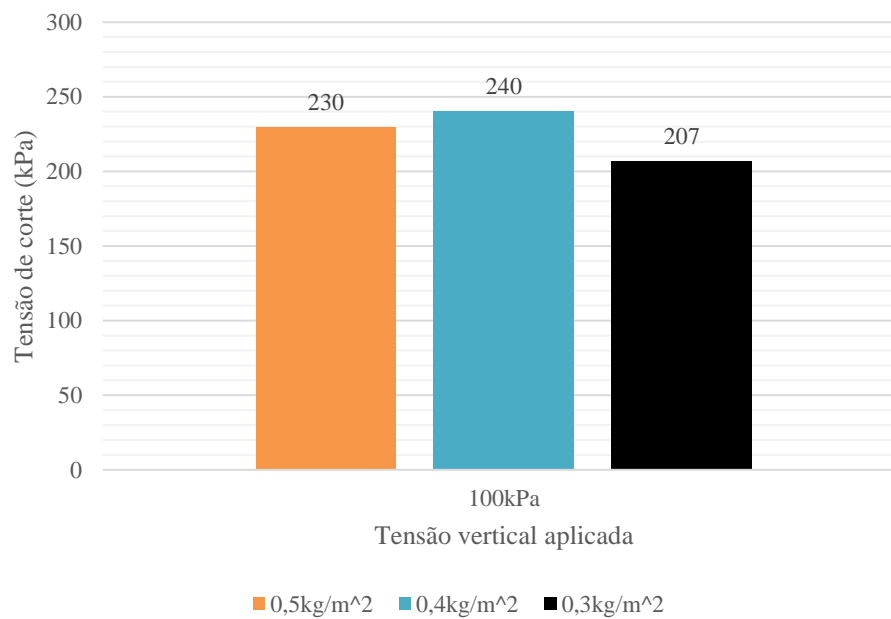
c) Taxa de emulsão betuminosa de 0,3kg/m<sup>2</sup>

Figura 5.5-Resistência máxima da rega de colagem obtida nos ensaios de corte direto para a mistura MB5,5%

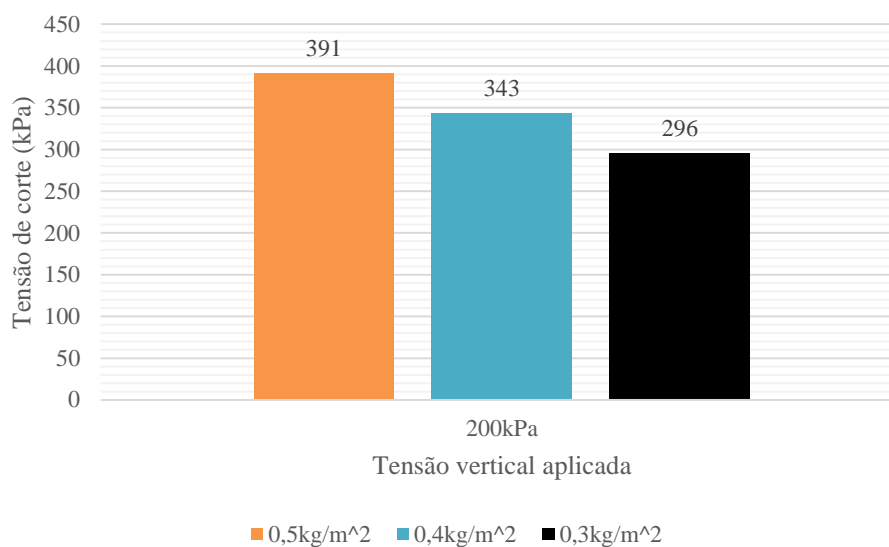
Na figura 5.6 pode-se observar a resistência ao corte para cada uma das pressões exercidas, comparando a resistência entre as taxas de emulsão betuminosas usada.



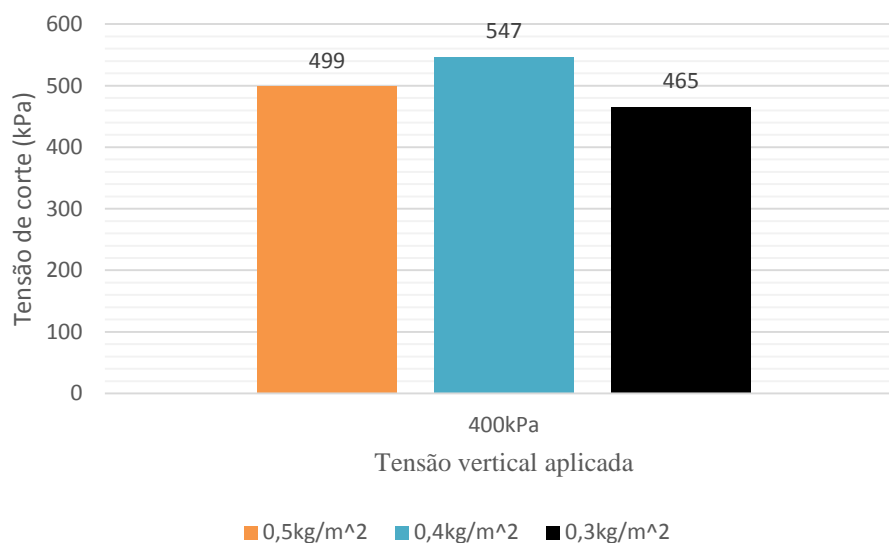
a) Tensão vertical de 50 kPa



b) Tensão Vertical de 100 kPa



c) Tensão vertical de 200 kPa



d) Tensão Vertical de 400 kPa

Figura 5.6-Comparação da resistência de ligação para a mistura MB5,5%, entre as taxas de emulsão betuminosa utilizadas para iguais pressões verticais

### 5.3. Discussão dos resultados

Os ensaios realizados às misturas MB5% e MB5,5% foram executados a uma temperatura entre os 13°C e 16°C, pois não foi possível manter uma temperatura constante, devido à falta de uma proteção térmica no laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Na figura 5.3 pode-se observar a evolução da resistência ao corte consoante a tensão vertical aplicada para cada uma das taxas de aplicação de uma emulsão betuminosa. Para tensões verticais menores a resistência ao corte deverá ser menor, devido ao facto de ser aplicada uma menor tensão vertical na superfície do provete que fará com que a força de atrito entre camadas seja menor, mas num dos casos isso não foi verificado sendo que foi obtido um valor fora deste contexto. Na figura 5.3 gráfico a), podemos verificar que quando foi exercida uma tensão vertical de 100 kPa a resistência ao corte foi menor do que quando foi exercida uma tensão vertical de 50 kPa. A discrepância neste valor poderá ter sido devido a uma mudança de temperatura não registada na altura do ensaio ou de ter sido executada uma má compactação do provete.

Como era esperado os valores de resistência máxima foram obtidos para uma tensão vertical de 400 kPa em todas as taxas de emulsão utilizadas, isto deve-se ao facto de a resistência de atrito ser maior entre camadas quanto maior for a tensão vertical aplicada.

Com base nos resultados obtidos, para uma tensão vertical de 50 kPa foi obtido uma melhor resistência ao corte para uma taxa de emulsão betuminosa de 0,3 kg/m<sup>2</sup>, enquanto que para uma tensão de 100 kPa e 200 kPa a resistência máxima foi obtida para uma taxa de emulsão de 0,4 kg/m<sup>2</sup> e por fim para uma tensão vertical de 400 kPa a resistência máxima foi obtida para uma taxa de emulsão de 0,5 kg/m<sup>2</sup>.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que, quanto maior for a tensão aplicada maior será a resistência de ligação entre camadas, ou seja, com o aumento da tensão vertical há um acréscimo da força de atrito na interface das camadas, fazendo com que a sua resistência ao corte direto seja maior. Num dos casos não se verificou o aumento de resistência podendo ter sido efeitos de uma má compactação do provete betuminoso ou uma ligeira mudança de temperatura não registada. Foi possível ainda concluir que para um aumento de tensão vertical, os valores de resistência foram maiores para taxas de emulsão betuminosa mais elevadas, ou seja, para uma tensão vertical mais baixa o valor da resistência máxima ao corte direto foi obtida para uma taxa de emulsão de 0,3 kg/m<sup>2</sup>, quando foi

aumentada a tensão vertical de 50 kPa para 100 kPa e 200 kPa, os valores de resistência máxima foram obtidos para uma taxa de emulsão mais alta ( $0,4 \text{ kg/m}^2$ ) e por fim quando aplicada uma tensão vertical de  $400 \text{ kPa/m}^2$  a resistência máxima ao corte foi obtida para uma taxa de emulsão de  $0,5 \text{ kg/m}^2$ . Este fenómeno poderá ser o efeito da camada betuminosa, sendo esta uma superfície porosa parte da emulsão betuminosa é absorvida fortalecendo as ligações no interior, daí quando é aplicada uma tensão vertical mais elevada os valores de resistência máxia ao corte serão obtidos para taxas de emulsão superiores.

A figura 5.7 repretenta os resultados obtidos de todos os ensaios efectuados para a mistura MB5%.

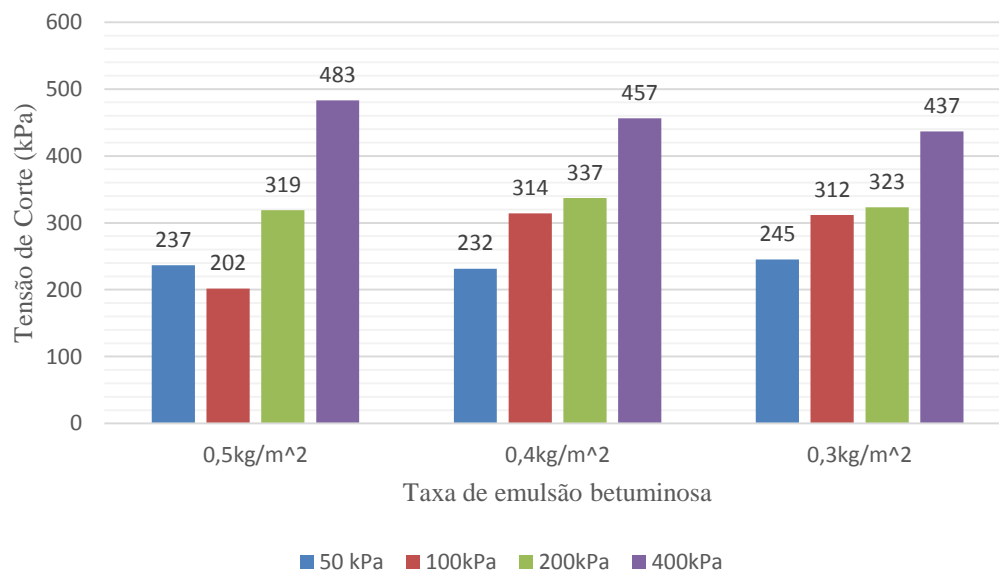


Figura 5.7-Resultados obtidos para a resistência ao corte para cada taxa de emulsão betuminosa e tensão vertical da mistura MB5%.

Segundo vários artigos científicos, uma quantidade mais baixa de emulsão betuminosa faz aumentar a resistência de ligação entre camadas, desde que esta cubra 100% da superfície de contacto e não seja aplicada nenhuma tensão normal, enquanto uma quantidade excessiva de emulsão betuminosa irá causar o aparecimento de uma camada mais espessa e mais deformável, que consequentemente irá causar uma diminuição na resistência da ligação e do atrito entre camadas. Nos ensaios realizados ao corte nesta dissertação nenhuma das quantidades usadas eram consideradas excessivas. Em todo o caso em pavimentos que se encontram em mau estado e irão receber uma nova camada betuminosa, uma quantidade mais elevada de emulsão betuminosa é recomendável, devido a fissuras e destacamentos na

superfície do pavimento que irá receber a rega de colagem, fazendo com que uma quantidade mais elevada cubra melhor a superfície de contacto, aumentando assim a resistência de ligação entre camadas.

Nos resultados obtidos para a mistura MB5,5% pode-se verificar recorrendo aos gráficos da figura 5.5, que foi obtido o mesmo critério de valores da mistura MB5%, quando aumentada a tensão vertical aplicada nos provetes betuminosos a resistência ao corte foi mais elevada, contendo os seus valores máximos de resistência quando aplicada uma tensão vertical de 400 kPa. Estes valores máximos de resistência foram obtidos para todas as taxas de emulsão betuminosa utilizadas.

Pode-se concluir que quanto maior for a tensão vertical aplicada, maior será a resistência ao corte, independentemente do estado da superfície de contacto da rega de colagem. Tal como aconteceu na mistura MB5% um dos valores registados não teve o mesmo seguimento dos outros resultados. Para uma tensão vertical de 100 kPa e uma taxa de emulsão de 0,5 kg/m<sup>2</sup> o valor da resistência ao corte foi menor que o valor registado para uma tensão vertical de 50 kPa contendo a mesma quantidade de emulsão betuminosa. Este resultado registado poderá ter sido efeitos de uma variação de temperatura na altura do ensaio.

Com base nos resultados que foram obtidos as taxas de emulsão betuminosas mais elevadas obtiveram melhores resultados de resistência ao corte para todas as tensões verticais aplicadas. Pode-se concluir com base nos resultados obtidos que para as taxas de emulsão mais elevadas utilizadas, foram obtidos melhores resultados de resistência ao corte, ou seja, para pavimentos em que a superfície onde será colocada a rega de colagem contenha fissuras, destacamentos ou mesmo em casos de fresagem, uma quantidade mais elevada de rega de colagem promoverá uma melhor ligação entre a camada em mau estado e a nova camada a ser colocada.

Na figura 5.8 pode observar-se todos os resultados obtidos nos ensaios realizados às amostras MB5,5%



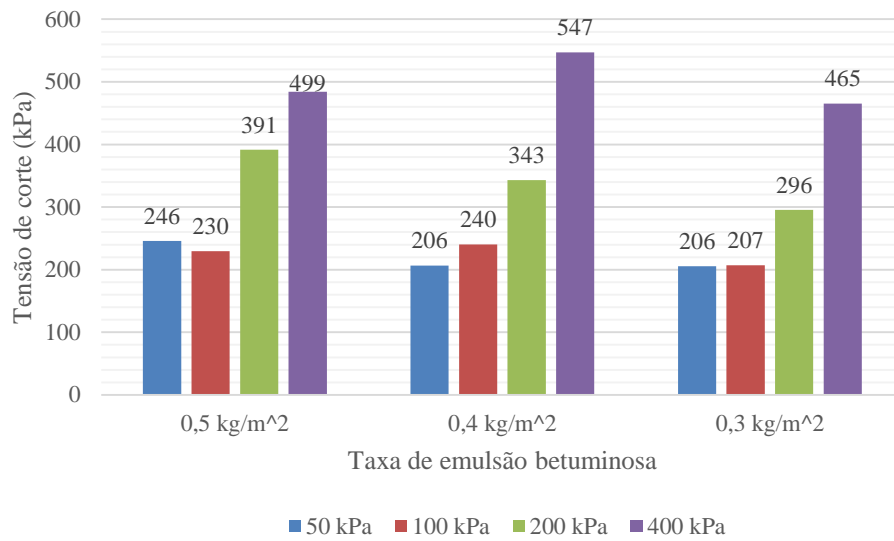


Figura 5.8-Resultados de todos os ensaios executados á mistura MB5,5%.

Todas as conclusões apresentadas foram com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados. Alguns dos valores registados ficaram abaixo do valor esperado muito devido à dificuldade encontrada em controlar a temperatura durante os ensaios de corte. Todos os ensaios foram efetuados no departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Todos os resultados dos ensaios encontram-se no Anexo C, descritos com mais pormenor e com imagens dos provetes após os ensaios de corte.



## *Capítulo 6*

---

### Considerações Finais



## 6. Considerações finais

O presente trabalho reporta um estudo acerca do uso de uma emulsão betuminosa como rega de colagem. Foi realizado o levantamento da literatura existente e posteriormente uma campanha experimental visando aferir a aplicabilidade de emulsões betuminosas na colagem de camadas betuminosas.

Para a realização dos ensaios de corte direto foi necessário executar dois acessórios de forma a adaptar a máquina de corte direto aos ensaios pretendidos, tendo sido a sua execução uma das fases mais complicadas devido à precisão que estes obrigavam, tornando-se assim um processo demorado para atingir a qualidade necessária. A maior dificuldade encontrada durante os ensaios de corte direto foram as variações de temperatura, pois era fulcral que esta fosse constante, como não foi possível contrariar este efeito optou-se por designar um intervalo de temperatura para que todos os ensaios efetuados fossem feitos dentro dos mesmo parâmetros.

Com base na pesquisa bibliográfica efetuada, foi possível adquirir conhecimento de como seria executada a aplicação da emulsão betuminosa nos provetes, quais seriam as condições que estes deveriam apresentar para que fosse possível obter a melhor interação entre camadas e de que forma dever-se-ia manusear a emulsão betuminosa, para que esta quando fosse aplicada nos provetes não se encontra-se inutilizável. Os cuidados no armazenamento e na aplicação da emulsão foram de extrema importância, para que os resultados não fossem influenciados pela má qualidade da emulsão, esta foi sempre armazenada no final de cada ensaio num local onde a temperatura não era superior a 100°C e inferior a 15°C e quando iniciado um novo processo de ensaios a emulsão betuminosa foi sempre agitada de forma suave para remover a fina película que se formava na sua superfície. A aplicação da emulsão betuminosa nos provetes foi sempre executada de forma uniforme e cobrindo 100% da superfície de contacto.

Após a execução do processo experimental e revisão bibliográfica pôde-se concluir que:

- Em geral, quanto maior for a tensão vertical aplicada, maior será o valor da resistência ao corte.
- Em pavimentos irregulares e degradados será necessário uma maior taxa de rega de colagem, de forma a proporcionar uma melhor ligação entre camadas.

- Em pavimentos novos uma taxa de rega de colagem mais baixa proporciona melhores resultados de ligação entre camadas.
- Uma aplicação uniforme da rega de colagem e com uma cobertura de 100% fará com que a ligação entre camadas seja mais forte.
- A temperatura tem uma grande influência na ligação.
- Uma superfície de aplicação livre de pó e material solto terá uma maior resistência de ligação quando comparado com uma situação em que exista material solto e pó na superfície de contacto onde será colocada a rega de colagem.
- O uso inadequado de uma emulsão betuminosa como rega de colagem não irá ter qualquer resultado favorável para o pavimento rodoviário.

Em suma, para que um pavimento rodoviário tenha um desempenho aceitável será necessário uma boa aplicação da rega de colagem, isto implica; (i) um bom conhecimento do material utilizado na mistura betuminosa, (ii) uma aplicação com 100% de cobertura da superfície e de forma homogénea, (iii) um bom conhecimento do tipo de obra e local onde irá ser realizada, (iv) uma superfície de contacto sem pó e material solto, (v) um bom conhecimento dos tipos de emulsão betuminosa existentes e as suas propriedades e por fim, (vi) um bom conhecimento de como preservar e transportar as emulsões betuminosas. O conhecimento destas especificidades garantirá a correta seleção e aplicação da rega de colagem, resultando numa adequada ligação entre camadas, garantindo dessa forma o adequado desempenho do pavimento rodoviário.

O subcapítulo seguinte é referente aos desenvolvimentos que poderão ser efetuados num futuro próximo, de forma a ter um conhecimento mais alargado e pormenorizado das emulsões betuminosas quando usadas como rega de colagem.

### 6.1.Desenvolvimentos futuros

Para uma nova avaliação das propriedades da rega de colagem em pavimentos rodoviários deverá ser usada uma câmara térmica, com o objetivo de controlar a temperatura a que é feito o ensaio. Com o uso de uma câmara térmica poderão ser realizados vários ensaios a diferentes temperaturas, de forma a avaliar o efeito que a temperatura exerce na resistência da rega de colagem.

Poderão ser feitos ensaios com diferentes emulsões betuminosas, verificando o efeito que esta tem na ligação de duas camadas betuminosas.

De acordo com alguns investigadores a percentagem de betume usado na mistura tem influência na ligação entre camadas, poderá então ser realizado um estudo usando várias misturas betuminosas com diferentes quantidades de betume com o objetivo de identificar qual a melhor taxa de aplicação de uma emulsão betuminosa consoante a quantidade de betume usado na mistura betuminosa.

Como foi referenciado anteriormente um pavimento coberto com sujidade onde seja aplicada uma rega de colagem, terá uma menor ligação entre camadas, neste caso poderá ser realizado um estudo de forma a comparar qual o efeito, entre uma superfície livre de sujidade e outra em que não seja feita uma limpeza prévia antes da aplicação da emulsão betuminosa.

Por fim também poderá ser desenvolvido um estudo de quais as consequências e efeitos de uma má uniformização da aplicação da rega de colagem de forma a conhecer as diferenças de resistência entre uma boa uniformização e uma má uniformização.





## ***Referências Bibliográficas***

---



## Referências Bibliográficas

- Alneami, Ali H. e Almudadi, Talal H. 2009.** *A Laboratory Tool Used to Evaluate the Reflective Cracking in.* Civil Dep., College of Engineering; Civil Dep., College of Engineering : s.n., 2009.
- Al-Qadi, Imad L., et al. 2012.** *Best Practices For Implementation Of Tack Coat: Part 1, Laboratory Study* . Illinois Center for Transportation . Illinois : s.n., 2012. Research Report ICT-12-004.
- Bernucci, Liedi Bariani, et al. 2008.** *Pavimentação asfáltica Formação básica para Engenheiros.* [ed.] Laura Maria Goretti da Motta, Jorge Augusto Pereira Ceratti e Jorge Barbosa Soares Copyright © 2007 Liedi Bariani Bernucci. 3°. Rio de Janeiro : s.n., 2008. Patrocinado por: Petrobras – Petróleo Brasileiro S. A. ; Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos.
- Branco, Fernando Castelo e Ferreira , Mário Quinta. 2009.** *Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal.* Departamento de Ciências da terra e Centro de Geociências , Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra . Coimbra : s.n., 2009. p. 92, Trabalho realizado para o InIR. Relatório Provisório .
- Branco, Fernando , Pereira , Paulo e Santos , Luís Picado . 2008.** *Pavimentos Rodoviários.* Coimbra : Edições Almedina. SA, 2008. p. 388. Vol. I.
- British Petroleum. 2008.** *Bitumen Emulsions.* BP Bitumen, BP Australia . Melbourne : s.n., 2008. Guide.
- Cao, Weidong. 2006.** Study on properties of recycled tire modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials.* Jingshi Road, Jinan, Shandong 250061, PR China : Elsevier Ltd., 2006, pp. 1011-1015.
- CEEP. 2009.** *Caderno de Encargos Tipo Obra.* 2009. p. 210. Vols. Volume V: 03 - Pavimentação - Capítulo 15.03. 15.03.
- CEPSA. 2006.** *Manual de Pavimentação.* [trad.] Maria de Lurdes Antunes. Barcelona : s.n., 2006.
- Chen, Jian-Shiuh e Huang, Chien-Chung. 2010.** Effect of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Tack Coat. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.*, 2010, pp. 142–149.
- Collop, A. C., et al. 2008.** Shear bond strenght between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores. [ed.] Elsevier Ltd. 28 de November de 2008, pp. 2251-2258.
- Curtis , Christine W., Ensley, Keith e Epps , Jon . 1993.** *Asphalt-Aggregate interaction including adhesion and absorption.* National Research Council . Washington, DC :

National Academy of Sciences, 1993. Strategic Highway Research Program . 0-309-05614-4 .

**Division of Construction California Department of Transportation. 2009.** *Tack Coat Guidelines*. Division Of Construction , California Department Of Transportation . California : s.n., 2009.

**dos Santos, Joana Micaela Rodrigues . 2010.** *Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários* . Departamento de Engenharia Civil , Universidade de Aveiro . Aveiro : s.n., 2010. Tese de Mestrado.

**Estradas de Portugal, S.A. 2009.** *Caderno de Encargos Tipo Obra*. 2009. p. 51. Vols. Volume V:03- Pavimentação- capítulo 16.

**F. CANESTRARI e E. SANTAGATA. 2004.** Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. 2004.

**Gardete, Dinis Correia. 2006.** *Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra . Coimbra : s.n., 2006. Tese de Mestrado.

**Ghaly, N.F., Ibrahim, I.M. e Noamy, E.M. 2013 .** Tack coats for asphalt paving. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25 de Setembro de 2013 , pp. 61-65.

**INIR. 2009.** *Directivas para Concepção de Pavimentos. Critérios de Dimensionamento* . Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP. 2009. p. 20, Disposições Normativas .

**InIR. Construção e Reabilitação de Pavimentos Ligantes Betuminosos.** Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP . Disposições Normativas. Trabalho Realizado pela empresa CAeMD- Publicações e Projectos de Engenharia, Lda .

**JAÉ. 1995.** *Manual de concepção de Pavimentos para a rede Rodoviária Nacional*. 1995.

**Kett, Irving. 1998.** *Asphalt Materials and Mix Design Manual*. New Jersey : Noyes Publications, 1998.

**Lombardi, B. 1993.** *Du Pétrole Brut Au Bitume: La Langue Marche*. Revue Général des Routes et des Aéroports, n.º 707. 1993.

**Medeiros, Marcelo S., Chehab, Ghassan R. e Solaimanian, Mansour. 2012.** *Investigation of Ultra-Rapid-Setting Emulsion for Tack Coat Applications*. 2012. pp. 80-88. 0361-1981.

**Modarres, Amir e Rahmanzadeh, Morteza . 2014.** Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. s.l. : Elsevier Ltd, 2014, Vol. 66, pp. 476–483.

**Mohammad, Louay N., et al. 2012.** *Optimization Of Tack Coat For HMA Placement*. Transportation Research Board 2012 Executive Committee, National Cooperative Highway

Research Program . WASHINGTON, D.C. : National academy of Science, 2012. REPORT 712.

**Neto, Silvrano Adonias Dantas. 2004.** *Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificadas com borracha de pneus usados*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental , Universidade de Brasília . Brasília : s.n., 2004. Tese de Doutorado.

**Pais , Jorge e Fonseca , Paulo. 2004.** *Influência do tipo de agregado e ligante no comportamento das misturas Betuminosas*. Lisboa : s.n., 2004.

**Raab, Cristiane , Abd El Halim, A.O e N.Partl, Manfred. 2011.** *Interlayer bond testing using a model material*. s.l. : Elsevier Ltdl., 2011. pp. 190-199.

**Raposeiras , A. C., et al. 2013.** New procedure to control the tack coat applied between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*. 9 de Abril de 2013, Vol. 44, pp. 228-235.

**Raposeiras, A. C., et al. 2013.** *Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers*. Santander : Elsevier, 2013. pp. 372-381.

**Read , John e Whiteoak, David. 2003.** *The Shell Bitumen handbook*. 5º Edição. London : Thomas Telford, 2003.

**Ribeiro, Raúl Manuel de Paiva. 2012.** *Aplicação de mistura aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários*. 2012.

**Rossetto, Cleusa M.** Ebah . *Ebah web site* . [Online] [Citação: 23 de Junho de 2014.] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAdDcAI/fatec-agregados>.

**Scholz, Todd V. 1995.** *Durability of bituminous paving mixtures*. University of Nottingham. 1995. Tese de Doutorado.

**Silva , Hugo M.R.D., Pais, Jorge C. e Pereira, Paulo A. A. 2007.** *Study of aggregate-mastic bond properties in bituminous mixtures*. Utah : s.n., 2007.

**Silva, Hugo Manuel Ribeiro Dias da. 2005.** *Caracterização do Mastique Betuminoso e da ligação Agregado-Mastique*. . Departamento Engenharia Civil , Universidade do Minho . Minho : s.n., 2005. Tese de Doutorado .

**West , Randy C., Zhang , Jingna e Moore , Jason. 2005.** *Evaluation of Bond Strenght Between Pavement Layers* . The Alabama Department of Transportation, Auburn University . Auburn, Alabama : s.n., 2005. NCAT Report 05-08 .

**Zadeh, Salman Hakim, Kebede, Nathan Abay e Buttlar, William G.** *Comparision between Optimum Tack Coat Application Rates as Obtained from Tension- And Torsional Shear Types Tests*.



# Anexo A

Ficha Técnica da Emulsão Betuminosa Catiónica  
(C60B4)





## BITEMULSION 60

### 1 - IDENTIFICAZIONE DELLA SOSTANZA O DELLA MISCELA E DELLA SOCIETÀ/IMPRESA

#### 1.1. Identificatore del prodotto

Codice: **C60B4**  
Denominazione: **Emulsione bituminosa cationica per mani d'attacco BITEMULSION 60 (C60B4)**  
Sinonimi: **Emulsione al 60% di legante per mani di attacco**

#### 1.2. Pertinenti usi identificati della sostanza o miscela e usi sconsigliati

**USI COMUNI:** legante, impermeabilizzante per la costruzione e manutenzione di strade, autostrade, aeroporti; da impiegare a temperatura ambiente o al max 60°C.

**USI SCONSIGLIATI:** Tutti gli altri usi sono sconsigliati a meno che non sia stata condotta una valutazione specifica, prima dell'utilizzo, che dimostri la possibilità di controllo e valutazione di tutti i rischi connessi.

#### 1.3. Informazioni sul fornitore della scheda di dati di sicurezza

Ragione Sociale: **BITEM S.r.l.**  
Indirizzo: **Via Dell'industria n° 81**  
Località e Stato: **41122 - Modena - ITALIA**  
  
Telefono e Fax: **(0039) 059 285202 – (0039) 059 2860310**  
  
e-mail info scheda di sicurezza: [info@satamugello.it](mailto:info@satamugello.it)

#### 1.4. Numero telefonico di emergenza

Per informazioni urgenti rivolgersi a: (0039) 059 285202

### 2 - IDENTIFICAZIONE DEI PERICOLI.

#### 2.1. Classificazione della sostanza o della miscela.

**Pericoli fisico-chimici:** nessun pericolo secondo i criteri e le disposizioni di cui al Regolamento (CE) 1272/2008 (CLP) (e successive modifiche ed adeguamenti).

**Pericoli per la salute:** il prodotto è classificato pericoloso per la salute secondo i criteri e le disposizioni di cui al Regolamento (CE) 1272/2008 (CLP) (e successive modifiche ed adeguamenti). Il prodotto pertanto richiede una scheda dati di sicurezza conforme alle disposizioni del Regolamento (CE) 1907/2006 e successive modifiche.

**Pericoli per l'ambiente:** nessun pericolo secondo i criteri e le disposizioni di cui al Regolamento (CE) 1272/2008 (CLP) (e successive modifiche ed adeguamenti).

Eventuali informazioni aggiuntive riguardanti i rischi per la salute e/o l'ambiente sono riportate alle sez. 11 e 12 della presente scheda.

##### 2.1.1. Regolamento 1272/2008 (CLP) e successive modifiche ed adeguamenti.

Classificazione e indicazioni di pericolo:  
Skin Sens. 1 **H317**

##### 2.1.2. Direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e successive modifiche ed adeguamenti.

Simboli di pericolo:  
--  
Frase R:  
--

#### 2.2. Elementi dell'etichetta.

Etichettatura di pericolo ai sensi del Regolamento (CE) 1272/2008 (CLP) e successive modifiche ed adeguamenti.



Avvertenze:  
**H317**  
**EUH071**  
  
Attenzione  
Può provocare una reazione allergica cutanea.  
Corrosivo per le vie respiratorie.

**P280**  
**P302+P352**  
**P333+P313**  
  
Indossare guanti / indumenti protettivi / proteggere gli occhi / il viso.  
IN CASO DI CONTATTO CON LA PELLE: lavare abbondantemente con acqua e sapone.  
In caso di irritazione o eruzione della pelle: consultare un medico.

Contiene: Alkenes, C11-C12

#### 2.3. Altri pericoli.

Informazioni non disponibili.



## BITEMULSION 60

### 3 - COMPOSIZIONE/INFORMAZIONI SUGLI INGREDIENTI.

#### 3.1. Sostanze.

Informazione non pertinente.

#### 3.2. Miscela.

La miscela è costituita essenzialmente da: Bitume 70/100 ed acqua e vari additivi emulsionabili

Nella miscela sono presenti le seguenti sostanze etichettate come pericolose:

Il testo completo delle frasi di rischio (R) e delle indicazioni di pericolo (H) è riportato alla sezione 16 della scheda.

Identificazione.	Conc. %.	Classificazione 67/548/CEE.	Classificazione 1272/2008 (CLP).
<i>Alkenes, C11-C12</i> CAS. 932-235-8 CE. - INDEX. -	1,4	Xn, N Frasi di rischio R: R36-R51/53-R65	Asp. Tox. 1 H304, Eye Irrit. 2 H319, Skin Sens. 1 H317, Aquatic Chronic 2 H411
<i>Acido Cloridrico</i> CAS. 7647-01-0 CE. 231-595-7 INDEX. -	0,17	Xi, C Frasi di rischio R: R34-R37	Press. Gas H280, Acute Tox. 3 H331, Skin Corr. 1A H314, EUH071
<i>Idrogeno Solforato</i> CAS 7783-06-4 CE. 231-977-3 INDEX. 231-977-3	< 0,05	F+, T+, N Frasi di rischio R R50-R12-R26	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Acute Tox. 2 (Inhalation), H330 Aquatic Acute 1, H400
<i>Glicol Etilenico</i> CAS 107-21-1 CE. 203-473-3 INDEX. 603-027-00-1	0,001	Xn Frasi di rischio R R22	Acute Tox. 4 H302

Nr. Reg. 01-2119484862-27-XXXX ( T+ = Molto Tossico(T+), T = Tossico(T), Xn = Nocivo(Xn), C = Corrosivo(C), Xi = Irritante(Xi), O = Comburente(O), E = Esplosivo(E), F+ = Estremamente Infiammabile(F+), F = Facilmente Infiammabile(F), N = Pericoloso per l'Ambiente(N) )

### 4 - MISURE DI PRIMO SOCCORSO.

#### 4.1. Descrizione delle misure di primo soccorso.

OCCHI: Eliminare eventuali lenti a contatto. Lavarsi immediatamente ed abbondantemente con acqua per almeno 15 minuti, aprendo bene le palpebre. Consultare un medico se il problema persiste.

PELLE: Togliersi di dosso gli abiti contaminati. Lavare abbondantemente con acqua e sapone. Lavare gli indumenti contaminati prima di riutilizzarli.

INALAZIONE: Rimuovere subito il paziente dall'ambiente contaminato e tenerlo a riposo in ambiente ben aerato. In caso di malessere consultare un medico.

INGESTIONE: Chiamare subito un medico. Non indurre il vomito. Non somministrare nulla che non sia espressamente autorizzato dal medico.

#### 4.2. Principali sintomi ed effetti, sia acuti che ritardati.

Per sintomi ed effetti dovuti alle sostanze contenute, vedere al cap. 11.

#### 4.3. Indicazione dell'eventuale necessità di consultare immediatamente un medico e trattamenti speciali.

Consultare sempre il medico in tutti i casi di gravi ustioni.

### 5 - MISURE ANTINCENDIO.

#### 5.1. Mezzi di estinzione.

##### MEZZI DI ESTINZIONE IDONEI

I mezzi di estinzione sono: anidride carbonica, schiuma, polvere chimica. Per le perdite e gli sversamenti del prodotto che non si sono incendiati, l'acqua nebulizzata può essere utilizzata per disperdere i vapori infiammabili e proteggere le persone impegnate a fermare la perdita.

##### MEZZI DI ESTINZIONE NON IDONEI

Non usare getti d'acqua. L'acqua non è efficace per estinguere l'incendio tuttavia può essere utilizzata per raffreddare i contenitori chiusi esposti alla fiamma prevenendo scoppi ed esplosioni.



## BITEMULSION 60

### 5.2. Pericoli speciali derivanti dalla sostanza o dalla miscela.

#### PERICOLI DOVUTI ALL'ESPOSIZIONE IN CASO DI INCENDIO

Si può creare sovrappressione nei contenitori esposti al fuoco con pericolo di esplosione. Evitare di respirare i prodotti di combustione.

### 5.3. Raccomandazioni per gli addetti all'estinzione degli incendi.

#### INFORMAZIONI GENERALI

Raffreddare con getti d'acqua i contenitori per evitare la decomposizione del prodotto e lo sviluppo di sostanze potenzialmente pericolose per la salute. Indossare sempre l'equipaggiamento completo di protezione antincendio. Raccogliere le acque di spegnimento che non devono essere scaricate nelle fognature. Smaltire l'acqua contaminata usata per l'estinzione ed il residuo dell'incendio secondo le norme vigenti.

#### EQUIPAGGIAMENTO

Indumenti normali per la lotta al fuoco, come un autorespiratore ad aria compressa a circuito aperto (EN 137), completo antifiama (EN469), guanti antifiama (EN 659) e stivali per Vigili del Fuoco (HO A29 oppure A30).

## 6 - MISURE IN CASO DI RILASCIO ACCIDENTALE.

### 6.1. Precauzioni personali, dispositivi di protezione e procedure in caso di emergenza.

In caso di fuoriuscita accidentale bloccare la perdita se non c'è pericolo.

Evitare di respirare vapori/gas.

Indossare adeguati dispositivi di protezione (compresi i dispositivi di protezione individuale di cui alla sezione 8 della scheda dati di sicurezza) onde prevenire contaminazioni della pelle, degli occhi e degli indumenti personali. Queste indicazioni sono valide sia per gli addetti alle lavorazioni che per gli interventi in emergenza.

### 6.2. Precauzioni ambientali.

Impedire (contenendo le perdite con terra, sabbia o altro materiale inerte) che il prodotto penetri nelle fognature, nelle acque superficiali, nelle falde freatiche. Se il prodotto è defluito in un corso d'acqua, in rete fognaria o ha contaminato il suolo o la vegetazione, avvisare le autorità competenti.

### 6.3. Metodi e materiali per il contenimento e per la bonifica.

Aspirare il prodotto fuoriuscito in recipiente idoneo. Valutare la compatibilità del recipiente da utilizzare con il prodotto, verificando la sezione 10. Assorbire il rimanente con materiale assorbente inerte.

### 6.4. Riferimento ad altre sezioni.

Eventuali informazioni riguardanti la protezione individuale e lo smaltimento sono riportate alle sezioni 8 e 13.

## 7 - MANIPOLAZIONE E IMMAGAZZINAMENTO.

### 7.1. Precauzioni per la manipolazione sicura.

Manipolare il prodotto dopo aver consultato tutte le altre sezioni di questa scheda di sicurezza. Evitare la dispersione del prodotto nell'ambiente. Non mangiare, né bere, né fumare durante l'impiego. Togliere gli indumenti contaminati e i dispositivi di protezione prima di accedere alle zone in cui si mangia.

### 7.2. Condizioni per l'immagazzinamento sicuro, comprese eventuali incompatibilità.

Conservare solo nel contenitore originale. Conservare i recipienti chiusi, in luogo ben ventilato, al riparo dai raggi solari diretti a temperatura ambiente compresa fra 5 e 40°C. Conservare i contenitori lontano da eventuali materiali incompatibili, verificando la sezione 10.

### 7.3. Usi finali particolari.

Informazioni non disponibili.

## 8 - CONTROLLO DELL'ESPOSIZIONE/PROTEZIONE INDIVIDUALE.

Il bitume ha una volatilità bassa e in condizioni normali la produzione di fumi è limitata.

Limitare comunque l'esposizione ai fumi.

In caso di operazioni in ambienti confinati, assicurare una ventilazione sufficiente.

### 8.1. Parametri di controllo.

Riferimenti Normativi:

Italia	Decreto Legislativo 9 Aprile 2008, n.81.
Svizzera	Valeurs limites d'exposition aux postes de travail 2012.
OEL EU	Direttiva 2009/161/UE; Direttiva 2006/15/CE; Direttiva 2004/37/CE; Direttiva 2000/39/CE.
TLV-ACGIH	ACGIH 2012

## BITEMULSION 60

### BITUME (fumi di bitume, frazione solubile in benzene del particolato inalabile)

#### Valore limite di soglia.

Tipo	Stato	TWA/8h mg/m <sup>3</sup>	ppm	STEL/15min mg/m <sup>3</sup>	ppm
TLV	I				
OEL	EU				
TLV-ACGIH		0,5			

### IDROGENO SOLFORATO

#### Valore limite di soglia.

Tipo	Stato	TWA/8h mg/m <sup>3</sup>	ppm	STEL/15min mg/m <sup>3</sup>	ppm
TLV	I	7	5	14	10
OEL	EU	7	5	14	10
TLV-ACGIH			1		5 10(C)

### GLICOL ETILENICO

#### Valore limite di soglia.

Tipo	Stato	TWA/8h mg/m <sup>3</sup>	ppm	STEL/15min mg/m <sup>3</sup>	ppm	
TLV	I	52	20	104	40	PELLE
OEL	EU	52	20	104	40	PELLE
TLV-ACGIH				100 (C)		

#### Indici biologici di esposizione

L'ACGIH prevede per i lavoratori esposti a fumi di asfalto/bitume la determinazione dell'idrocarburo policiclico aromatico 1-idrossipirene (1-HP) nelle urine (con idrolisi). Prelievo a fine turno alla fine della settimana lavorativa (la determinazione è qualitativa, non è fissato un limite quantitativo).

### 8.2. Controlli dell'esposizione.

#### PROTEZIONE DELLE MANI

Proteggere le mani con guanti da lavoro di categoria II (rif. Direttiva 89/686/CEE e norma EN 374) quali in PVC, neoprene, nitrile o equivalenti. Per la scelta definitiva del materiale dei guanti da lavoro si devono considerare: degradazione, tempo di rottura e permeazione. Nel caso di preparati la resistenza dei guanti da lavoro deve essere verificata prima dell'utilizzo in quanto non prevedibile. I guanti hanno un tempo di usura che dipende dalla durata di esposizione.

#### PROTEZIONE DEGLI OCCHI

Indossare occhiali protettivi ermetici (rif. norma EN 166).

#### PROTEZIONE DELLA PELLE

Indossare abiti da lavoro con maniche lunghe e calzature di sicurezza per uso professionale di categoria II (rif. Direttiva 89/686/CEE e norma EN 344). Lavarsi con acqua e sapone dopo aver rimosso gli indumenti protettivi.

#### PROTEZIONE RESPIRATORIA

In caso di superamento del valore di soglia (se disponibile) di una o più delle sostanze presenti nel prodotto, riferito all'esposizione giornaliera nell'ambiente di lavoro o a una frazione stabilita dal servizio di prevenzione e protezione aziendale, indossare una maschera con filtro di tipo B o di tipo universale la cui classe (1, 2 o 3) dovrà essere scelta in relazione alla concentrazione limite di utilizzo (rif. Norma EN 141).

L'utilizzo di mezzi di protezione delle vie respiratorie, come maschere del tipo sopra indicato, è necessario in assenza di misure tecniche per limitare l'esposizione del lavoratore. La protezione offerta dalle maschere è comunque limitata.

Prevedere un sistema per il lavaggio oculare e doccia di emergenza.

#### CONTROLLI DELL'ESPOSIZIONE AMBIENTALE.

Le procedure di monitoraggio devono essere selezionate sulla base delle indicazioni stabilite dalle autorità locali competenti o dai contratti nazionali di lavoro. Fare riferimento al D.Lgs 81/2008 e alle buone pratiche di igiene industriale.

### 9 - PROPRIETÀ FISICHE E CHIMICHE.

#### 9.1. Informazioni sulle proprietà fisiche e chimiche fondamentali.

Stato Fisico	liquido viscoso
Colore	bruno scuro
Odore	caratteristico a caldo, inodore a freddo
Soglia olfattiva.	
pH.	da 1,5 a 4
Punto di ebollizione iniziale	> 100 °C.
Punto di infiammabilità.	> 230 °C.
Densità relativa.	0,98-1,02 (g/cm <sup>3</sup> ).
Solubilità	solubile nei principali solventi organici



## BITEMULSION 60

Coefficiente di ripartizione  
(n-ottanolo/acqua):  
Viscosità a 40° C (foro da 2 mm.)  
Proprietà esplosive  
Proprietà ossidanti

Non disponibile.  
15 – 45 sec.  
Non esplosivo  
Non ossidante

### 9.2. Altre informazioni.

Informazioni non disponibili.

## 10 – STABILITÀ E REATTIVITÀ.

### 10.1. Reattività.

Evitare il contatto con emulsioni di natura basica o con reagenti chimici (prodotti alcalini) che agiscono sul pH

### 10.2. Stabilità chimica.

Il prodotto è stabile nelle normali condizioni di impiego e di stoccaggio.

### 10.3. Possibilità di reazioni pericolose.

In condizioni di uso e stoccaggio normali non sono prevedibili reazioni pericolose.

### 10.4. Condizioni da evitare.

Nessuna in particolare. Attenersi tuttavia alla usuali cautele nei confronti dei prodotti chimici. Evitare condizioni di freddo estremo in quanto il preparato contiene acqua e a temperature inferiori ai 3°C può congelare. Il congelamento altera il prodotto

### 10.5. Materiali incompatibili.

Incompatibilità con forti agenti ossidanti

### 10.6. Prodotti di decomposizione pericolosi.

Il prodotto può rilasciare solfuro di idrogeno: effettuare una valutazione specifica dei rischi da inalazione derivanti dalla presenza di solfuro di idrogeno negli spazi liberi delle cisterne, negli ambienti confinati, nei residui e nelle eccedenze di prodotto e in tutte le situazioni di rilascio non intenzionale, per determinare quali siano i migliori mezzi di controllo in funzione delle condizioni locali. L'idrogeno solforato può accumularsi nei serbatoi o in luoghi confinati, con pericolo per gli operatori che devono accedervi. In questo caso la sovraesposizione può causare irritazione delle vie respiratorie, vertigini, nausea, perdita di conoscenza e morte.

## 11 - INFORMAZIONI TOSSICOLOGICHE.

### 11.1. Informazioni sugli effetti tossicologici.

In mancanza di dati tossicologici sperimentali sul prodotto stesso, gli eventuali pericoli del prodotto per la salute sono stati valutati in base alle proprietà delle sostanze contenute, secondo i criteri previsti dalla normativa di riferimento per la classificazione. Considerare perciò la concentrazione delle singole sostanze pericolose eventualmente citate in sez. 3, per valutare gli effetti tossicologici derivanti dall'esposizione al prodotto.

#### BITUME (Tutti i tipi) (N/A)

DL 50 orale ratto

≥ 5000 mg/Kg di peso corporeo (OECD 401) (API, 1982)

#### BITUME (Tutti i tipi) (N/A)

DL50 cutaneo coniglio

≥ 2000 mg/Kg di peso corporeo (OECD 402) (API, 1982)

CL50 inalazione ratto (mg/l)

≥ 94,4 mg/m<sup>3</sup> (Fumi di asfalto (bitume)) (OECD 403 – Frunhofer Institute, 2000)

Il contatto del prodotto con la pelle provoca una sensibilizzazione (dermatite da contatto). La dermatite si origina in seguito ad un'inflammatione della cute, che inizia nelle zone cutanee che vengono a contatto ripetuto con l'agente sensibilizzante. Le lesioni cutanee possono comprendere eritemi, edemi, papule, vescicole, pustole, squame, fissurazioni e fenomeni essudativi, che variano a seconda delle fasi della malattia e delle zone colpite. Nella fase acuta prevalgono eritema, edema ed essudazione. Nelle fasi croniche prevalgono squame, secchezza, fissurazione ed ispessimenti della cute.

L'elevata corrosività danneggia gravemente le vie respiratorie in caso di inalazione.

## 12 - INFORMAZIONI ECOLOGICHE.

Il prodotto non è classificato come pericoloso per l'ambiente secondo i criteri fissati dalla UE. La dispersione nell'ambiente può comunque comportare la contaminazione delle matrici ambientali (suolo, sottosuolo, acque superficiali e sotterranee). Utilizzare secondo la buona pratica lavorativa, evitando di disperdere il prodotto nell'ambiente.



## BITEMULSION 60

### 12.1. Tossicità.

#### BITUME (Tutti i tipi) (N/A)

CL 50 pesci 1	≥ 1000 mg/l (LL 50 / 96 h) (QSAR, Oncorhynchus mykiss, Redman et al., 2010)
CL 50 pesci 2	≥ 1000 mg/l (LL 50 / 28 d) (QSAR, Oncorhynchus mykiss, Redman et al., 2010)
NOEC (cronico)	≥ 1000 mg/l (NOEL / 28 d) (QSAR, Oncorhynchus mykiss, Redman et al., 2010)

### 12.2. Persistenza e degradabilità.

#### BITUME (Tutti i tipi) (N/A)

Persistenza e biodegradabilità	I costituenti principali del prodotto sono da considerare "interamente" biodegradabili, ma non "prontamente" biodegradabili: pertanto possono risultare moderatamente persistenti, particolarmente in condizioni anaerobiche.
--------------------------------	---

### 12.3. Potenziale di bioaccumulo.

Informazioni non disponibili.

### 12.4. Mobilità nel suolo.

Informazioni non disponibili

### 12.5. Risultati della valutazione PBT e vPvB.

In base ai dati disponibili, il prodotto non contiene sostanze PBT o vPvB in percentuale superiore a 0,1%.

### 12.6. Altri effetti avversi.

Informazioni non disponibili.

Nota: I bitumi in acqua galleggiano od affondano, manifestano poca tendenza a disperdersi e sono persistenti. Principale effetto fisico è l'adsorbimento sul sedimento. Sul suolo i bitumi sono immobili ed inerti, con l'adsorbimento come principale effetto fisico.

## 13 - CONSIDERAZIONI SULLO SMALTIMENTO.

### 13.1. Metodi di trattamento dei rifiuti.

Riutilizzare, se possibile. I residui del prodotto sono da considerare rifiuti speciali pericolosi. La pericolosità dei rifiuti che contengono in parte questo prodotto deve essere valutata in base alle disposizioni legislative vigenti. Lo smaltimento deve essere affidato ad una società autorizzata alla gestione dei rifiuti, nel rispetto della normativa nazionale ed eventualmente locale.

IMBALLAGGI CONTAMINATI

Gli imballaggi contaminati devono essere inviati a recupero o smaltimento nel rispetto delle norme nazionali sulla gestione dei rifiuti.

## 14 - INFORMAZIONI SUL TRASPORTO.

Numero ONU: Merce non pericolosa ai sensi delle norme sul trasporto.

Nome di spedizione dell'ONU: N.A.

Classe/i di pericolo per il trasporto: N.A.

Gruppo d'imballaggio: N.A.

Pericoli per l'ambiente: Merce non pericolosa per l'ambiente

Precauzioni speciali per gli utilizzatori: Nessuna

Il trasporto deve essere effettuato negli imballaggi originali e, comunque, in imballaggi che siano costituiti da materiali inattaccabili dal contenuto e non suscettibili di generare con questo reazioni pericolose.

## 15 - INFORMAZIONI SULLA REGOLAMENTAZIONE.

15.1. Norme e legislazione su salute, sicurezza e ambiente specifiche per la sostanza o la miscela.

Categoria Seveso. Nessuna.

Restrizioni relative al prodotto o alle sostanze contenute secondo l'Allegato XVII Regolamento (CE) 1907/2006.

Prodotto.

Punto. 3

Sostanze in Candidate List (Art. 59 REACH).

Nessuna.

## BITEMULSION 60

Sostanze soggette ad autorizzazione (Allegato XIV REACH).

Nessuna.

Sostanze soggette ad obbligo di notifica di esportazione Reg. (CE) 689/2008:

Nessuna.

Sostanze soggette alla Convenzione di Rotterdam:

Nessuna.

Sostanze soggette alla Convenzione di Stoccolma:

Nessuna.

Controlli Sanitari.

I lavoratori esposti a questo agente chimico pericoloso per la salute devono essere sottoposti alla sorveglianza sanitaria effettuata secondo le disposizioni dell'art. 41 del D.Lgs. 81 del 9 aprile 2008 salvo che il rischio per la sicurezza e la salute del lavoratore sia stato valutato irrilevante, secondo quanto previsto dall'art. 224 comma 2.

### 15.2. Valutazione della sicurezza chimica.

Non è stata elaborata una valutazione di sicurezza chimica per la miscela mentre per le sostanze in essa contenute quali il bitume e aliene C11-C12 sono state effettuate le rispettive Valutazioni della Sicurezza Chimica.

### 16 - Altre informazioni.

Testo delle indicazioni di pericolo (H) citate alle sezioni 2-3 della scheda:

Press. Gas	Gas sotto pressione
Flam. Gas	Gas infiammabili Categoria 1
Acute Tox. 2 (Inhalation)	Tossicità acuta (per inalazione) Categoria 2
Acute Tox. 3 Acute	Tossicità acuta, categoria 3
Asp. Tox. 1	Pericolo in caso di aspirazione, categoria 1
Skin Corr. 1A	Corrosione cutanea, categoria 1A
Eye Irrit. 2	Irritazione oculare, categoria 2
Skin Sens. 1	Sensibilizzazione cutanea, categoria 1
Aquatic Chronic 2	Pericoloso per l'ambiente acquatico, tossicità cronica, categoria 2
Aquatic Acute 1	Pericoloso per l'ambiente acquatico - Pericolo acuto categoria 1
H220	Gas altamente infiammabile
H280	Contiene gas sotto pressione; può esplodere se riscaldato.
H302	Nocivo se ingerito.
H304	Può essere letale in caso di ingestione e di penetrazione nelle vie respiratorie.
H314	Provoca gravi ustioni cutanee e gravi lesioni oculari.
H317	Può provocare una reazione allergica cutanea.
H319	Provoca grave irritazione oculare.
H330	Letale se inalato.
H331	Tossico se inalato.
H400	Molto tossico per gli organismi acquatici
H411	Tossico per gli organismi acquatici con effetti di lunga durata.
EUH071	Corrosivo per le vie respiratorie.
R12	Estremamente infiammabile.
R22	Nocivo in caso di ingestione.
R26	Molto tossico per inalazione.
R34	Provoca ustioni
R36	Irritante per gli occhi
R37	Irritante per le vie respiratorie
R50	Altamente tossico per gli organismi acquatici
R65	Nocivo: può causare danni ai polmoni in caso di ingestione
R51/53	Tossico per gli organismi acquatici, può provocare a lungo termine effetti negativi per l'ambiente acquatico

#### LEGENDA:

- ADR: Accordo europeo per il trasporto delle merci pericolose su strada
- CAS: NUMBER: Numero del Chemical Abstract Service
- CE50: Concentrazione che dà effetto al 50% della popolazione soggetta a test
- CE NUMBER: Numero identificativo in ESIS (archivio europeo delle sostanze esistenti)
- CLP: Regolamento CE 1272/2008
- DNEL: Livello derivato senza effetto
- EmS: Emergency Schedule
- GHS: Sistema armonizzato globale per la classificazione e la etichettatura dei prodotti chimici
- IATA DGR: Regolamento per il trasporto di merci pericolose della Associazione internazionale del trasporto aereo





## BITEMULSION 60

- IC50: Concentrazione di immobilizzazione del 50% della popolazione soggetta a test
- IMDG: Codice marittimo internazionale per il trasporto delle merci pericolose
- IMO: International Maritime Organization
- INDEX NUMBER: Numero identificativo nell'Annesso VI del CLP
- LC50: Concentrazione letale 50%
- LD50: Dose letale 50%
- OEL: Livello di esposizione occupazionale
- PBT: Persistente, bioaccumulante e tossico secondo il REACH
- PEC: Concentrazione ambientale prevedibile
- PEL: Livello prevedibile di esposizione
- PNEC: Concentrazione prevedibile priva di effetti
- REACH: Regolamento CE 1907/2006
- RID: Regolamento per il trasporto internazionale di merci pericolose su treno
- TLV: Valore limite di soglia
- TLV CEILING: Concentrazione che non deve essere superata durante qualsiasi momento dell'esposizione lavorativa.
- TWA STEL: Limite di esposizione a breve termine
- TWA: Limite di esposizione medio pesato
- VOC: Composto organico volatile
- vPvB: Molto persistente e molto bioaccumulante secondo il Reach.

### BIBLIOGRAFIA GENERALE:

1. Direttiva 1999/45/CE e successive modifiche
2. Direttiva 67/548/CEE e successive modifiche ed adeguamenti
3. Regolamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo (REACH)
4. Regolamento (CE) 1272/2008 del Parlamento Europeo (CLP)
5. Regolamento (CE) 790/2009 del Parlamento Europeo (I Atp. CLP)
6. Regolamento (CE) 453/2010 del Parlamento Europeo
7. Regolamento (CE) 286/2011 del Parlamento Europeo (II Atp. CLP)
8. The Merck Index. Ed. 10
9. Handling Chemical Safety
10. Niosh - Registry of Toxic Effects of Chemical Substances
11. INRS - Fiche Toxicologique
12. Patty - Industrial Hygiene and Toxicology
13. N.I. Sax - Dangerous properties of Industrial Materials-7 Ed., 1989
14. Sito Web Agenzia ECHA

### Nota per l'utente:

Le informazioni contenute in questa scheda si basano sulle conoscenze disponibili presso di noi alla data dell'ultima versione. L'utente deve assicurarsi della idoneità e completezza delle informazioni in relazione allo specifico uso del prodotto.

Non si deve interpretare tale documento come garanzia di alcuna proprietà specifica del prodotto.

Poiché l'uso del prodotto non cade sotto il nostro diretto controllo, è obbligo dell'utente osservare sotto la propria responsabilità le leggi e le disposizioni vigenti in materia di igiene e sicurezza. Non si assumono responsabilità per usi impropri.

Fornire adeguata formazione al personale addetto all'utilizzo di prodotti chimici.



# Anexo B

## Características das misturas MB5% e MB5,5%



## Características dos materiais utilizados

Britas Graníticas:

Peneiração:

Quadro Anexo B. 1-Peneiração das Britas Graníticas

Abertura do peneiro	% Cumulativa de Material Passado		
mm	Brita 4/8	Brita 4/12	Pó de Pedra
63,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	100,0	100,0
8,0	89,9	14,9	100,0
4,0	2,2	0,5	91,1
2,0	0,2	0,3	65,9
1,0	0,2	0,2	42,3
0,500	0,1	0,2	28,0
0,250	0,1	0,2	18,3
0,125	0,1	0,2	8,2
0,063	0,0	0,1	2,1

Curva Granulométrica:

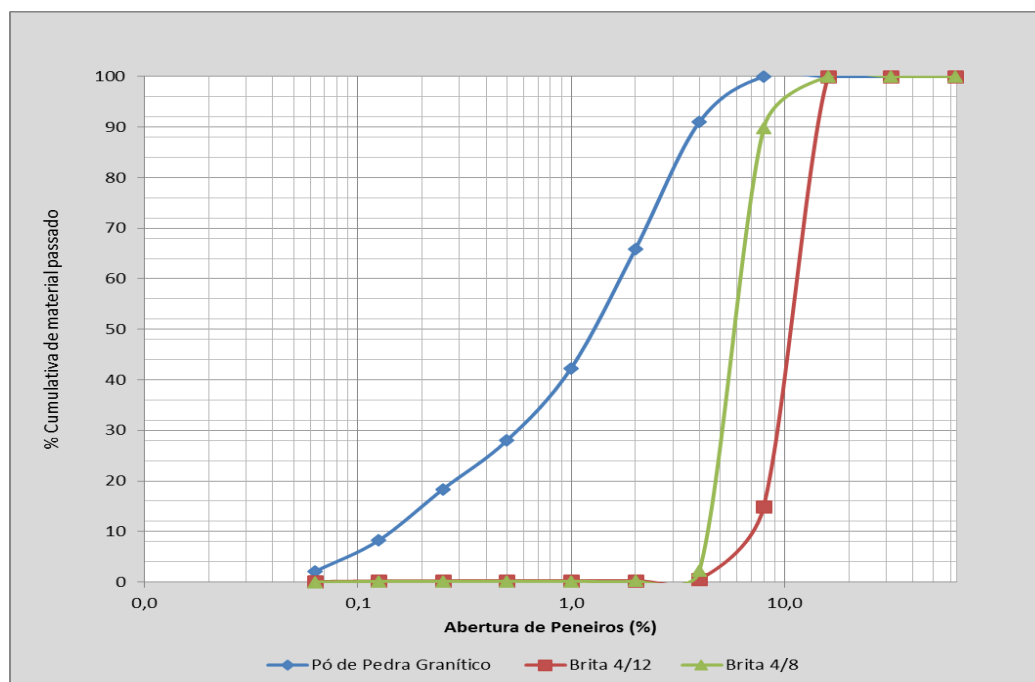


Figura Anexo B. 1-Curvas Granulométricas dos Agregados

## Características das Misturas Betuminosas

### Mistura betuminosa MB5%

mm	Peneiros	Brita 1 4/8		Brita 2 4/12		Pó de pedra		Filer		curva de mistura	fuso adoptado	
		Gran. %	23,00%	Gran. %	32,00%	Gran. %	40,00%	Gran. %	5,00%		min.	máx.
63,0	2 1/2	100,0	23,0	100,0	32,0	100,0	40,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
31,5	1 1/4	100,0	23,0	100,0	32,0	100,0	40,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
16,0	5/8	100,0	23,0	100,0	32,0	100,0	40,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
8,0	5/16	89,9	20,7	14,9	4,8	100,0	40,0	100,0	5,0	70,4	67,0	77,0
4,0	5	2,2	0,5	0,5	0,2	91,1	36,4	100,0	5,0	42,1	40,0	52,0
2,0	10	0,2	0,0	0,3	0,1	65,9	26,3	100,0	5,0	31,5	25,0	40,0
1,0	18	0,2	0,0	0,2	0,1	42,3	16,9	100,0	5,0	22,0		
0,500	35	0,1	0,0	0,2	0,1	28,0	11,2	100,0	5,0	16,3	11,0	19,0
0,250	60	0,1	0,0	0,2	0,1	18,3	7,3	100,0	5,0	12,4		
0,125	120	0,1	0,0	0,2	0,1	8,2	3,3	100,0	5,0	8,4	6,0	10,0
0,063	230	0,0	0,0	0,1	0,0	2,1	0,8	90,0	4,5	5,4	5,0	8,0
Fundo	-											

Figura Anexo B. 2-Preparação da mistura MB5% com base no fuso granulométrico

Quadro Anexo B. 2- Percentagem e quantidade (gramas) de cada material usado para a mistura MB5%

% De agregados	100%
Brita 4/8	23%
Brita 4/12	32%
Pó de Pedra	40%
Fíler	5%
Total	100%

Brita 4/8	219(g)
Brita 4/12	304(g)
Pó de pedra	380(g)
Fíler	48(g)
Betume	50(g)
Total (g)	1000(g)

Curva Granulométrica:

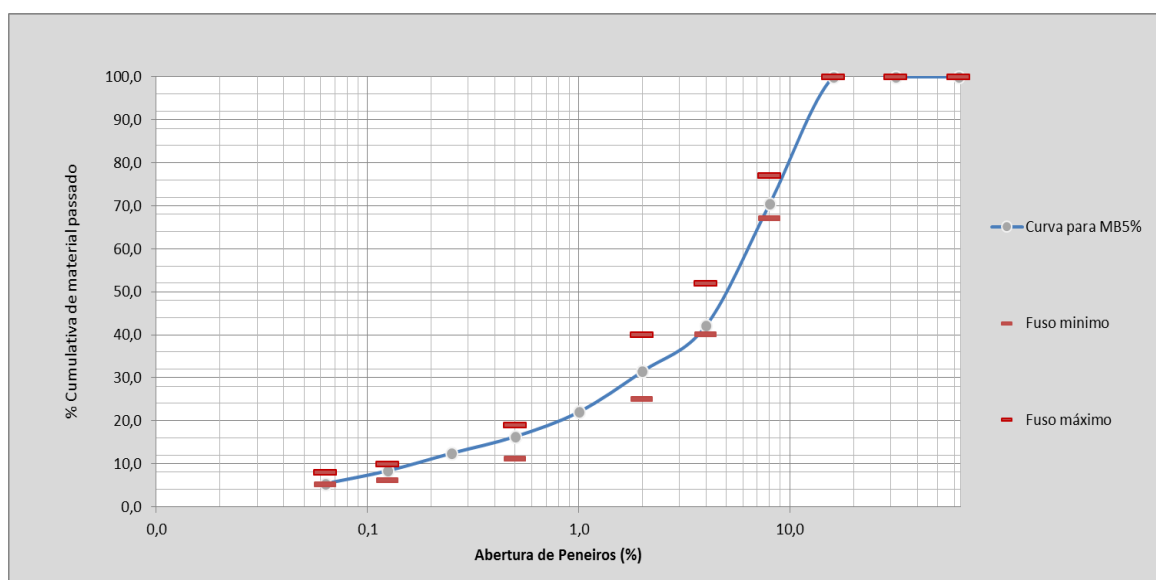


Figura Anexo B. 3-Curva granulométrica da mistura MB5%

Mistura Betuminosa MB5,5%

mm	Peneiros	Brita 1 4/8		Brita 2 4/12		Pó de pedra		Filer		curva de mistura	fuso adoptado	
		Gran. %	22,00%	Gran. %	32,00%	Gran. %	41,00%	Gran. %	5,00%		min.	máx.
63,0	2 1/2	100,0	22,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
31,5	1 1/4	100,0	22,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
16,0	5/8	100,0	22,0	100,0	32,0	100,0	41,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0
8,0	5/16	89,9	19,8	14,9	4,8	100,0	41,0	100,0	5,0	70,6	67,0	77,0
4,0	5	2,2	0,5	0,5	0,2	91,1	37,3	100,0	5,0	43,0	40,0	52,0
2,0	10	0,2	0,0	0,3	0,1	65,9	27,0	100,0	5,0	32,1	25,0	40,0
1,0	18	0,2	0,0	0,2	0,1	42,3	17,3	100,0	5,0	22,5		
0,500	35	0,1	0,0	0,2	0,1	28,0	11,5	100,0	5,0	16,6	11,0	19,0
0,250	60	0,1	0,0	0,2	0,1	18,3	7,5	100,0	5,0	12,6		
0,125	120	0,1	0,0	0,2	0,1	8,2	3,4	100,0	5,0	8,5	6,0	10,0
0,063	230	0,0	0,0	0,1	0,0	2,1	0,9	90,0	4,5	5,4	5,0	8,0
Fundo	-											

Figura Anexo B. 4-Preparação da mistura MB5,5% com base no fuso granulométrico

% De agregados	94,50%
Brita 4/8	20,79%
Brita 4/12	30,24%
Pó de Pedra	38,75%
Fíler	4,73%
Total	94,50%

Brita 4/8	208 (g)
Brita 4/12	302 (g)
Pó de pedra	387 (g)
Fíler	47 (g)
Betume	55 (g)
Total (g)	1000 (g)

Curva Granulométrica:

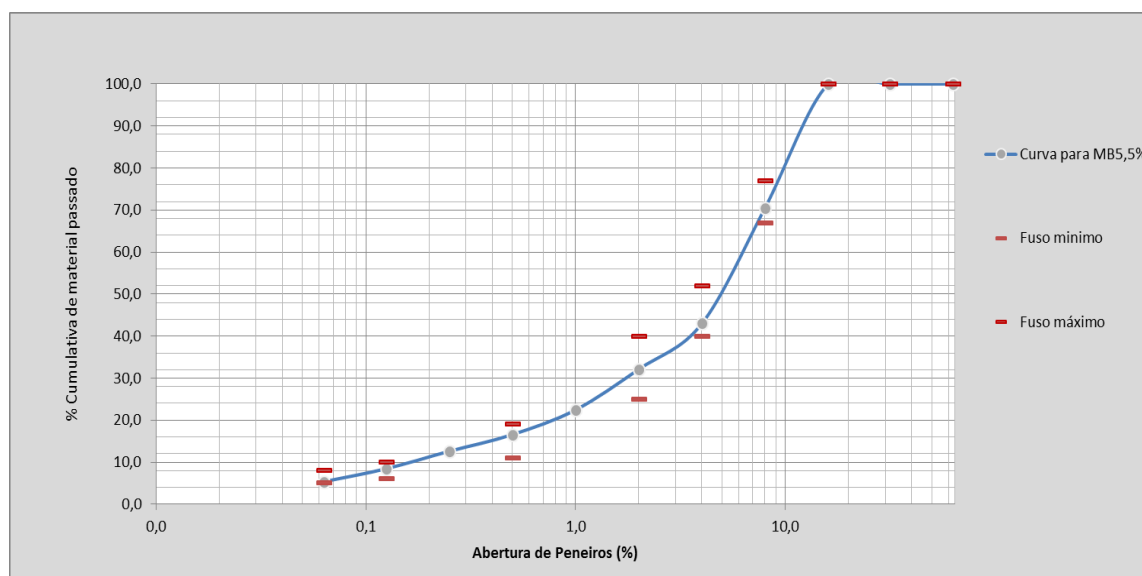


Figura Anexo B. 5-Curva granulométrica da mistura MB5%

## Ensaio Marshall

No ensaio Marshall foi usado o anel de 50kN

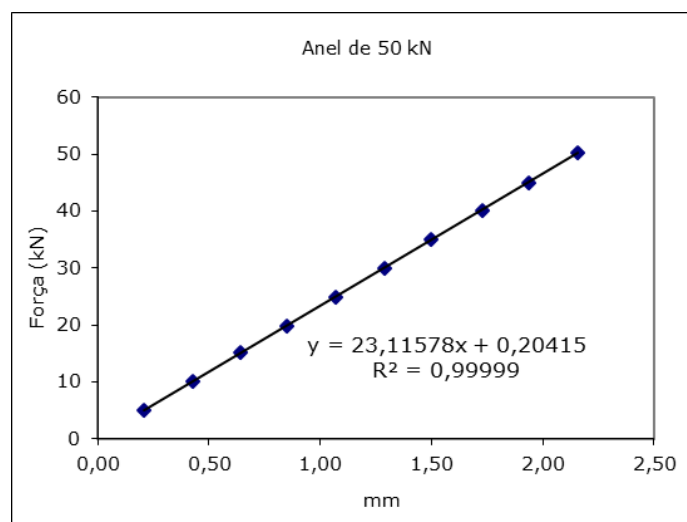


Figura Anexo B. 6-Reta de calibração do anel de 50 kN

### Resultados dos ensaios Marshall:

#### Mistura MB5,5%:

Quadro Anexo B.3-Características físicas dos provetes da mistura MB5,5% e resultados do ensaio Marshall

Proвете nº	Peso do agregado (g)	Peso do betume (g)	Força de rotura (KN)	Deslocamento (mm)
1	945	55	13,61	0,58
2	945	55	9,75	0,413
3	945	55	9,75	0,413
4	945	55	10,37	0,44
5	945	55	10,6	0,45

Mistura MB5%:

Quadro Anexo B. 4-Características físicas dos provetes da mistura MB5% e resultados do ensaio Marshall

Proвете n°	Peso do agregado (g)	Peso do betume (g)	Deslocamento (mm)	Força de rotura (KN)
1	950	50	0,49	11,53
2	950	50	0,516	12,13
3	950	50	0,444	10,46
4	950	50	0,46	10,83
5	950	50	0,449	10,58
6	950	50	0,467	10,99
7	950	50	0,538	12,64

## Baridade máxima e Baridade aparente

Baridade aparente:

Resultados para a mistura MB5,5%:

Quadro Anexo B. 5-Características da mistura MB5,5%

Proвете n°	Peso do agregado (g)	Peso do betume (g)	Peso do provete ao ar (g)	Peso do provete em água (g)	Massa da amostra com superfície seca (g)	Volume da amostra (cm <sup>3</sup> )	Baridade (g/cm <sup>3</sup> )
1	945	55	1000,9	578,2	1005,3	427,1	2,34
2	945	55	986,9	564	989,9	425,9	2,32
3	945	55	989,1	570,8	994	423,2	2,34
4	945	55	995,9	574,5	998,7	424,2	2,35
5	945	55	997,8	573,5	1000,3	426,8	2,34

Resultados para a mistura MB5%:

Quadro Anexo B. 6-Características da mistura MB5%

Proвете nº	Peso do agregado (g)	Peso do betume (g)	Peso do provete ao ar (g)	Peso do provete em água (g)	Massa da amostra com superfície seca (g)	Volume da amostra (cm <sup>3</sup> )	Baridade (g/cm <sup>3</sup> )
7	950	50	1000,4	577,3	1005,2	427,9	2,34
8	950	50	996,2	570,9	1001,8	430,9	2,31
9	950	50	996,8	571,5	1001,9	430,4	2,32
10	950	50	987,0	561,0	990,2	429,2	2,30
11	950	50	994,4	569,8	1003,2	433,4	2,29
12	950	50	995,5	569,0	1004,8	435,8	2,28
13	950	50	997,3	564,8	1000,9	436,1	2,29

Baridade máxima:

Neste processo foram escolhidas quatro amostras de um conjunto total de doze, duas amostra MB5% e duas MB5,5%.

Resultados para a mistura MB5,5%:

Quadro Anexo B. 7-Baridade máxima da mistura MB5,5%

Amostra		5,5% de ligante
Massa da amostra seca (g)	Ms	1989
Massa do picnómetro cheio de água (g)	Mp	6027
Massa do picnómetro cheio de água + amostra (g)	Mt	7200
Volume da amostra (cm <sup>3</sup> )	$V = M_s + M_p - M_t$	816
Baridade máxima teórica da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{máx}} = M_s / V$	2,44

Resultados para a mistura MB5%:

Quadro Anexo B. 8-Baridade máxima para a mistura MB5%

Amostra		5,0% de ligante
Massa da amostra seca (g)	Ms	1982
Massa do picnómetro cheio de água (g)	Mp	5997
Massa do picnómetro cheio de água + amostra (g)	Mt	7220
Volume da amostra (cm <sup>3</sup> )	$V = M_s + M_p - M_t$	759
Baridade máxima teórica da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{máx}} = M_s / V$	2,61



## Características finais das amostras.

Quadro Anexo B. 9- Características Finais das misturas MB5% e MB5,5%

Mistura	%Betum.	Baridade Max. Teorica	Baridade Aparente	Poros	Teor volum. Betume	Vol. Vazios Esquel. Agregado	Grau de Satura. (vazios com betume)	Força de rotura
nº	Pbe	Bt (g/cm <sup>3</sup> )	Bm (g/cm <sup>3</sup> )	n %	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)	Fr (kN)
-	-	-	-	(Bt-Bm)/Bt	(Bm*Pbe)/yb	n+TVB	TVB/VMA	-
MB5%	5%	2,61	2,30	12%	11%	23%	49%	11,309
MB5,5%	5,5%	2,44	2,34	4%	12%	17%	75%	10,816



# Anexo C

Fichas dos Ensaaios de Corte direto



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 1**

Identificação do Provete:

Provete nº12

Identificação da Mistura:

MB5,0%

Taxa de aplicação de

0,5 Kg/m<sup>2</sup>

emulsão betuminosa:

Tensão Normal ( $\sigma$ ):50 kPaCaracterísticas do provete: Raio:50,5 (mm) Diâmetro:101(mm<sup>2</sup>) Área:8012(mm<sup>2</sup>)

Tempo (s)	0,01 Desl.horiz. (div)	$\alpha$ (Ângulo)	10KN Leitura anel (mm)	$\Delta L/L_0$ $\epsilon$	mm <sup>2</sup> A	kN T	kPa $\zeta$
0	0	0,00	0,000	0,00000	8012	0,00	0
15	2	3,23	0,033	0,0002	8011,8	0,16	20
30	11	7,56	0,063	0,0011	8011,4	0,28	35
45	22	10,70	0,105	0,0022	8010,5	0,44	55
60	35	13,50	0,135	0,0035	8009,1	0,56	70
75	41	14,61	0,157	0,0041	8008,4	0,65	81
90	51	16,30	0,187	0,0050	8007,0	0,77	96
105	62	17,97	0,219	0,0061	8005,4	0,89	111
120	74	19,64	0,257	0,0073	8003,5	1,04	130
135	85	21,05	0,297	0,0084	8001,5	1,20	150
150	98	22,61	0,337	0,0097	7999,1	1,36	170
165	110	23,96	0,375	0,0109	7996,8	1,51	188
180	121	25,14	0,415	0,0120	7994,5	1,66	208
195	134	26,46	0,451	0,0133	7991,7	1,80	226
210	150	28,00	0,473	0,0149	7988,1	1,89	237
225	180	30,69	0,441	0,0178	7980,8	1,76	221
240	275	37,99	0,191	0,0272	7954,5	0,78	98
255	290	39,02	0,182	0,0287	7950,0	0,75	94
270	312	40,49	0,170	0,0309	7943,2	0,70	88
285	328	41,53	0,168	0,0325	7938,1	0,69	87
300	351	42,98	0,167	0,0348	7930,7	0,69	87
315	367	43,96	0,169	0,0363	7925,4	0,70	88
330	385	45,04	0,170	0,0381	7919,3	0,70	88
345	403	46,09	0,172	0,0399	7913,2	0,71	89
360	420	47,07	0,169	0,0416	7907,3	0,70	88
375	441	48,25	0,168	0,0437	7899,9	0,69	88
390	464	49,51	0,167	0,0459	7891,7	0,69	87

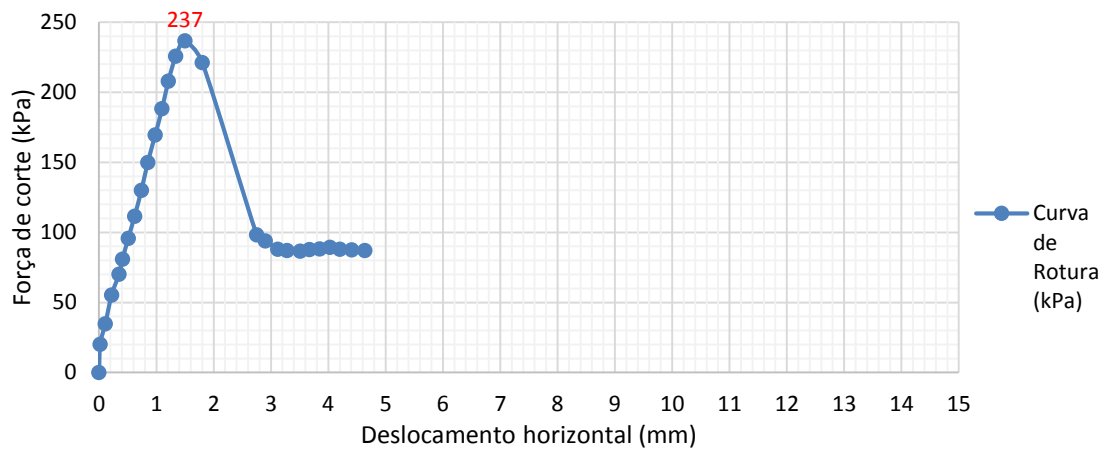
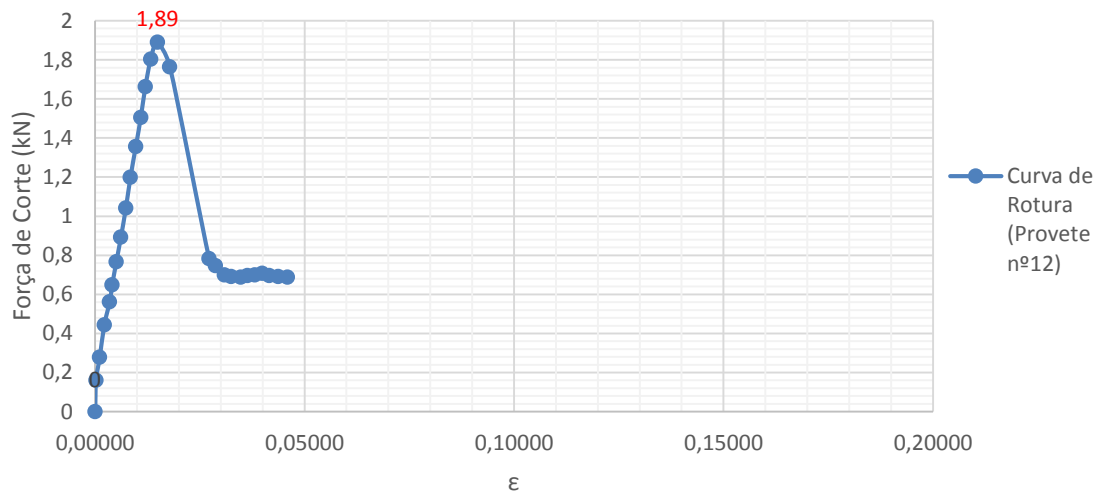


Figura Anexo C.1-Provete nº12 da mistura MB5,0% antes e depois do ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 2**

Identificação do

Provete nº 8

Provete:

Identificação da

MB5,0%

Mistura:

Taxa de aplicação de

0,4 Kg/m<sup>2</sup>

emulsão betuminosa:

Tensão Normal ( $\sigma$ ):50 kPa

Características do

provete:

Raio:50,75(mm)Diâmetro:101,5(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	Desl.horiz. (div)	(Ângulo)	Leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0		0,00	0,000	0,0000	8011,8	0,00	0
15	27	11,83	0,012	0,0027	8010,0	0,08	10
30	50	16,10	0,028	0,0050	8007,2	0,14	18
45	72	19,33	0,049	0,0071	8003,8	0,22	28
60	94	22,09	0,075	0,0093	7999,9	0,33	41
75	113	24,23	0,109	0,0112	7996,1	0,46	58
90	131	26,09	0,141	0,0130	7992,3	0,59	73
105	143	27,27	0,175	0,0142	7989,6	0,72	90
120	154	28,30	0,207	0,0152	7987,1	0,85	106
135	166	29,39	0,244	0,0164	7984,2	0,99	124
150	178	30,44	0,282	0,0176	7981,2	1,14	143
165	188	31,29	0,32	0,0186	7978,7	1,29	162
180	199	32,20	0,356	0,0197	7975,8	1,43	179
195	209	33,00	0,389	0,0207	7973,2	1,56	196
210	221	33,94	0,42	0,0219	7969,9	1,68	211
225	234	34,93	0,446	0,0232	7966,3	1,78	224
240	252	36,26	0,461	0,0250	7961,1	1,84	232
255	297	39,40	0,39	0,0294	7947,7	1,56	197
270	410	46,38	0,117	0,0406	7910,5	0,49	62
285	433	47,68	0,112	0,0429	7902,4	0,47	60
300	459	49,11	0,1	0,0454	7893,2	0,42	54
315	481	50,29	0,113	0,0476	7885,2	0,48	60
330	512	51,92	0,112	0,0507	7873,8	0,47	60
345	530	52,84	0,11	0,0525	7867,1	0,46	59
360	558	54,24	0,109	0,0552	7856,5	0,46	59
375	572	54,93	0,11	0,0566	7851,2	0,46	59

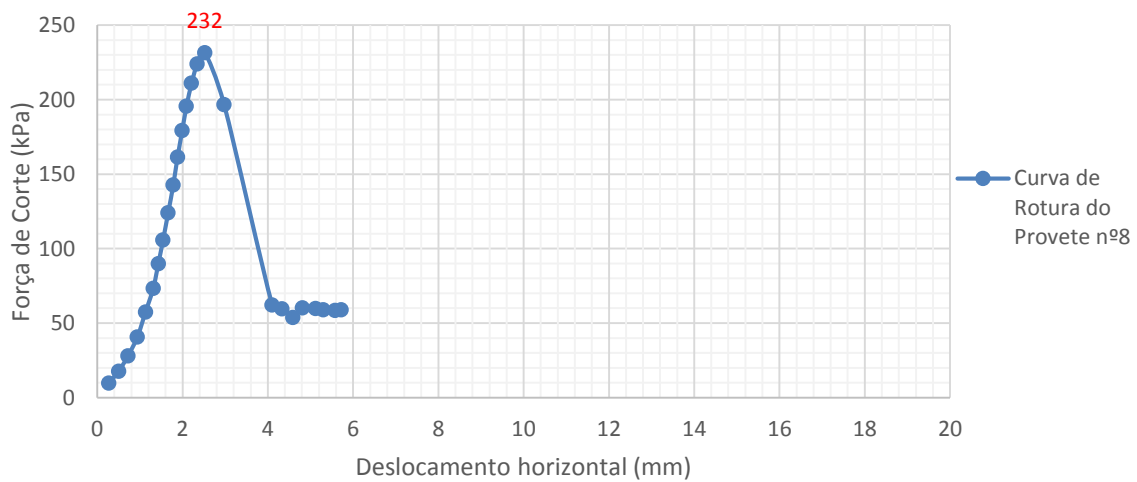
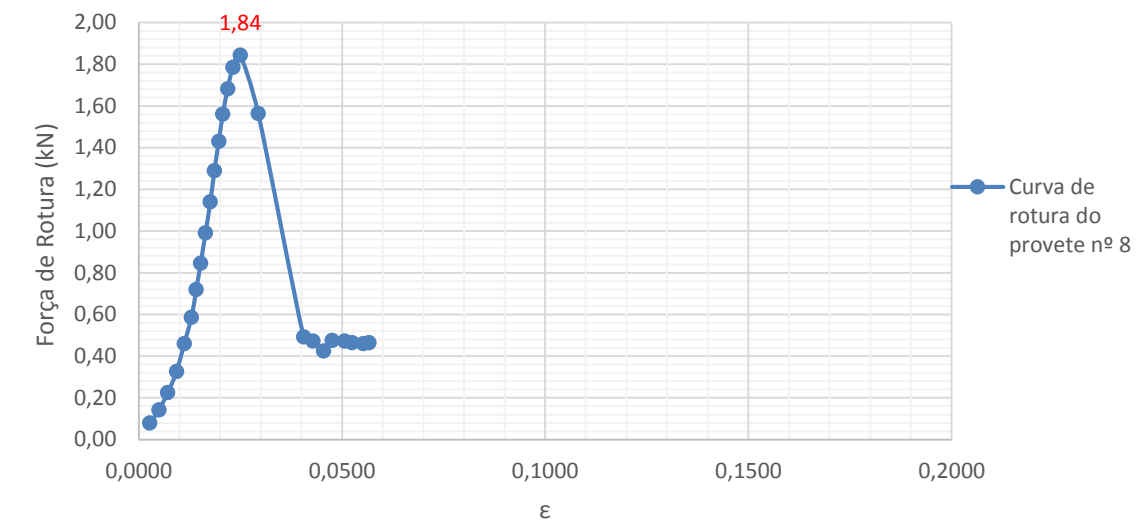


Figura Anexo C.2-Provete nº 8 da mistura MB5,0% antes e depois da rotura



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 24**

Identificação do Provete:

Provete nº 7

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):50 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,6(mm)Diâmetro:101,2(mm<sup>2</sup>)Área:8012(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0		0,00		0,00000		0	0
15	4	4,55	0,019	0,0004	8011,8	0,11	13
30	11	7,55	0,03	0,0011	8011,8	0,15	19
45	21	10,44	0,061	0,0021	8011,8	0,27	34
60	30	12,48	0,091	0,0030	8011,8	0,39	49
75	43	14,94	0,134	0,0043	8011,8	0,56	70
90	54	16,75	0,174	0,0053	8011,7	0,72	89
105	65	18,38	0,22	0,0064	8011,7	0,90	112
120	76	19,88	0,257	0,0075	8011,7	1,04	130
135	86	21,15	0,307	0,0085	8011,6	1,24	155
150	96	22,35	0,348	0,0095	8011,6	1,40	175
165	106	23,49	0,393	0,0105	8011,5	1,58	197
180	117	24,68	0,436	0,0116	8011,5	1,75	218
195	128	25,82	0,492	0,0127	8011,4	1,97	245
210	150	27,96	0,463	0,0149	8011,3	1,85	231
225	215	33,51	0,29	0,0213	8010,9	1,17	146
240	248	36,01	0,256	0,0246	8010,6	1,04	130
255	270	37,58	0,257	0,0267	8010,4	1,04	130
270	297	39,44	0,246	0,0294	8010,2	1,00	125
285	320	40,95	0,238	0,0317	8010,0	0,97	121
300	345	42,54	0,231	0,0342	8009,7	0,94	117
315	373	44,25	0,225	0,0369	8009,4	0,92	114
330	398	45,73	0,223	0,0394	8009,1	0,91	113

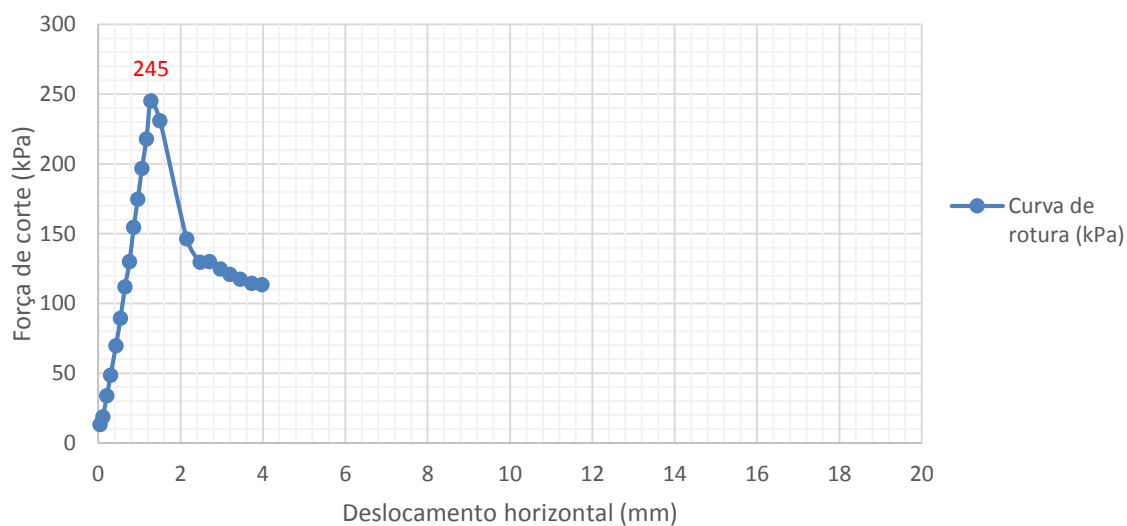
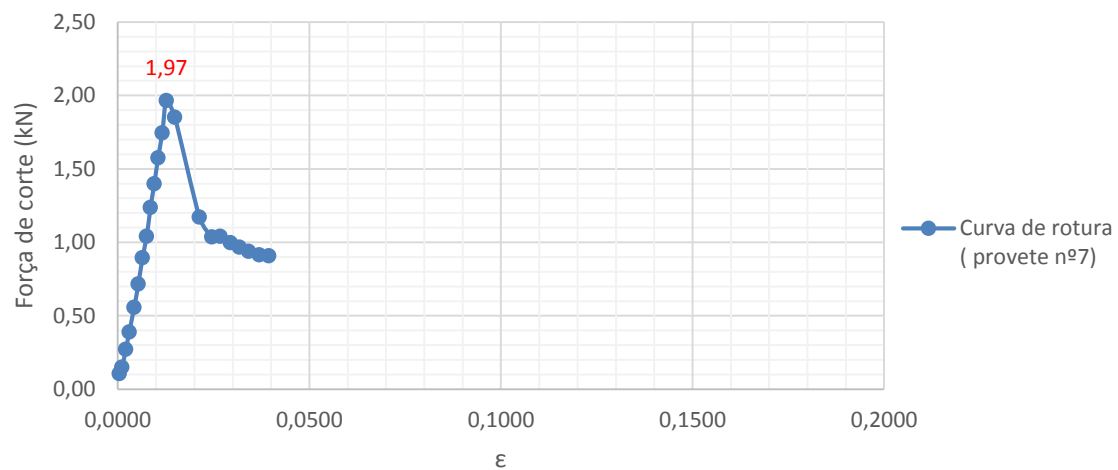


Figura Anexo C. 3-Provete nº7 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 3**

Identificação do

Provete nº 1

Provete:

Identificação da

MB5,0%

Mistura:

Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:

0,3 Kg/m<sup>2</sup>

Tensão Normal ( $\sigma$ ):

100 kPa

Características do  
provete:

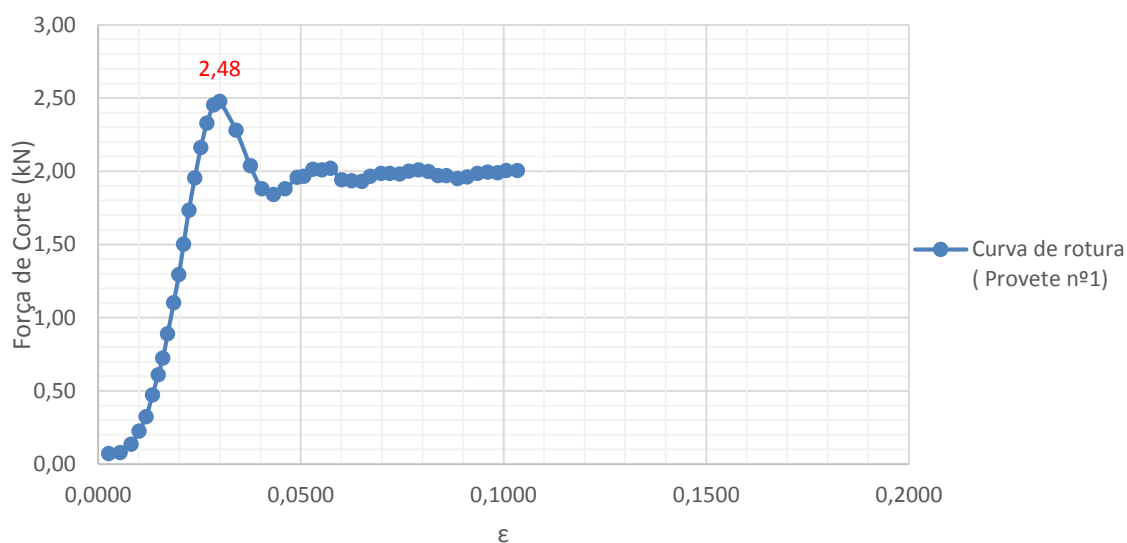
Raio:50,7(mm)

Diâmetro:101,5(mm<sup>2</sup>)

Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	Desl.horiz. (div)	(Ângulo)	Leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0,00	0,0000	8011,8	0,00	0
15	26	11,60	0,01	0,0026	8010,1	0,07	9
30	55	16,89	0,012	0,0054	8006,4	0,08	10
45	82	20,63	0,026	0,0081	8002,1	0,13	17
60	102	23,01	0,049	0,0100	7998,3	0,22	28
75	120	24,97	0,074	0,0118	7994,7	0,32	40
90	136	26,59	0,112	0,0134	7991,2	0,47	59
105	150	27,93	0,147	0,0148	7988,0	0,61	76
120	162	29,03	0,176	0,0160	7985,2	0,72	91
135	174	30,09	0,218	0,0171	7982,2	0,89	111
150	189	31,37	0,272	0,0186	7978,4	1,10	138
165	202	32,44	0,321	0,0199	7975,0	1,29	162
180	214	33,40	0,374	0,0211	7971,8	1,50	188
195	227	34,40	0,433	0,0224	7968,2	1,73	218
210	242	35,53	0,489	0,0238	7964,0	1,95	245
225	257	36,62	0,542	0,0253	7959,7	2,16	272
240	272	37,69	0,584	0,0268	7955,3	2,33	293
255	289	38,86	0,616	0,0285	7950,1	2,45	309
270	304	39,86	0,622	0,0300	7945,5	2,48	312
285	345	42,50	0,572	0,0340	7932,4	2,28	287
300	381	44,69	0,51	0,0375	7920,4	2,04	257
315	410	46,38	0,47	0,0404	7910,5	1,88	238
330	439	48,01	0,46	0,0433	7900,3	1,84	233
345	468	49,60	0,47	0,0461	7889,9	1,88	238
360	498	51,19	0,49	0,0491	7879,0	1,96	248
375	515	52,07	0,492	0,0507	7872,7	1,97	250
390	538	53,24	0,504	0,0530	7864,1	2,01	256

405	560	54,34	0,503	0,0552	7855,8	2,01	256
420	582	55,42	0,506	0,0573	7847,4	2,02	257
435	610	56,76	0,486	0,0601	7836,6	1,94	248
450	635	57,94	0,484	0,0626	7826,8	1,93	247
465	660	59,09	0,483	0,0650	7817,0	1,93	247
480	681	60,05	0,492	0,0671	7808,6	1,97	252
495	708	61,26	0,497	0,0698	7797,8	1,99	255
510	730	62,22	0,497	0,0719	7789,0	1,99	255
525	755	63,31	0,496	0,0744	7778,9	1,98	255
540	778	64,29	0,501	0,0767	7769,5	2,00	258
555	802	65,30	0,503	0,0790	7759,7	2,01	259
570	827	66,34	0,5	0,0815	7749,5	2,00	258
585	851	67,33	0,493	0,0838	7739,6	1,97	254
600	872	68,18	0,493	0,0859	7730,9	1,97	255
615	900	69,30	0,488	0,0887	7719,3	1,95	253
630	924	70,24	0,491	0,0910	7709,4	1,96	254
645	950	71,26	0,497	0,0936	7698,6	1,99	258
660	975	72,22	0,499	0,0961	7688,1	1,99	259
675	1000	73,17	0,498	0,0985	7677,7	1,99	259
690	1022	74,00	0,502	0,1007	7668,5	2,00	261
705	1050	75,05	0,502	0,1034	7656,8	2,00	262



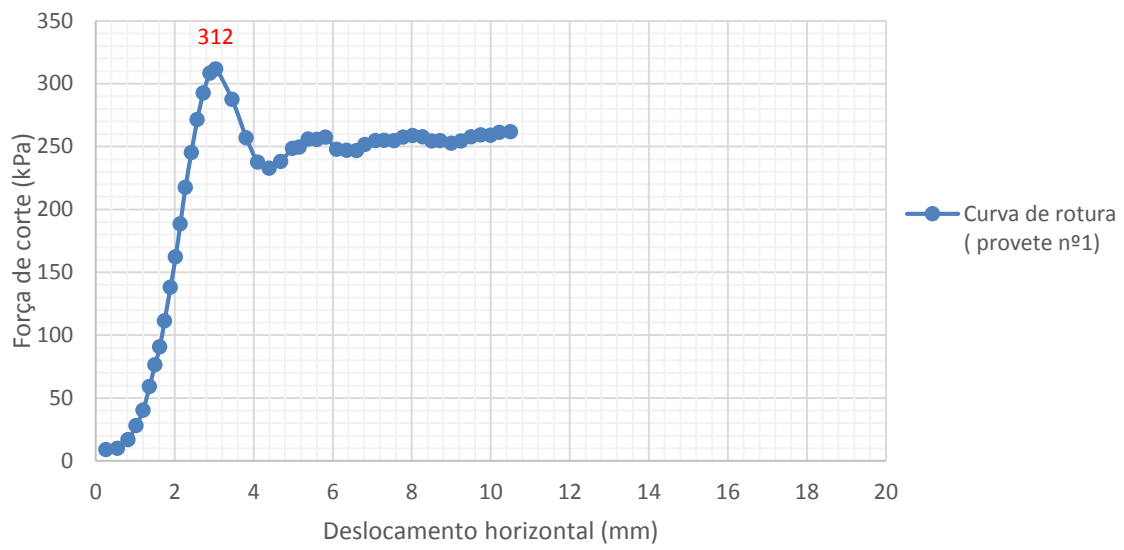


Figura Anexo C. 4-Provete nº1 da mistura MB5,0% antes e depois do ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 4**

Identificação do Provete:

Provete nº 11

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):100 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:51(mm)Diâmetro:102(mm<sup>2</sup>)Área:8012(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	Desl.horiz. (div)	(Ângulo)	Leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,0	0,000	0,00000	8012	0	0
15	5	5,1	0,025	0,0010	8011,7	0,13	16,2
30	14	8,6	0,049	0,0028	8011,2	0,22	28,0
45	22	10,8	0,077	0,0044	8010,5	0,33	41,8
60	32	13,0	0,117	0,0064	8009,5	0,49	61,4
75	44	15,2	0,155	0,0088	8008,0	0,64	80,0
90	56	17,2	0,197	0,0112	8006,3	0,81	100,7
105	58	17,5	0,241	0,0116	8006,0	0,98	122,3
120	81	20,7	0,283	0,0162	8002,3	1,14	143,0
135	96	22,5	0,331	0,0192	7999,6	1,33	166,6
150	108	23,9	0,364	0,0216	7997,3	1,46	182,9
165	119	25,1	0,393	0,0238	7995,0	1,58	197,2
180	138	27,0	0,402	0,0276	7990,9	1,61	201,7
195	165	29,5	0,380	0,0330	7984,7	1,53	191,0
210	211	33,4	0,285	0,0422	7972,9	1,15	144,5
225	240	35,6	0,267	0,0480	7965,0	1,08	135,7
240	262	37,3	0,268	0,0524	7958,7	1,09	136,3
255	287	39,0	0,260	0,0574	7951,2	1,05	132,5
270	311	40,6	0,255	0,0622	7943,9	1,03	130,2
285	337	42,3	0,251	0,0674	7935,7	1,02	128,3
300							
315							

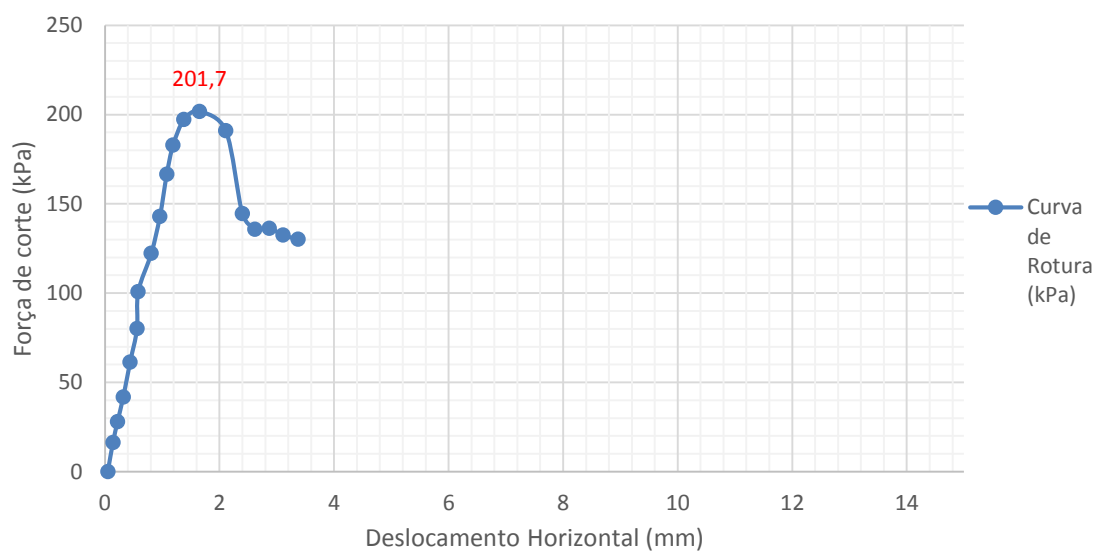
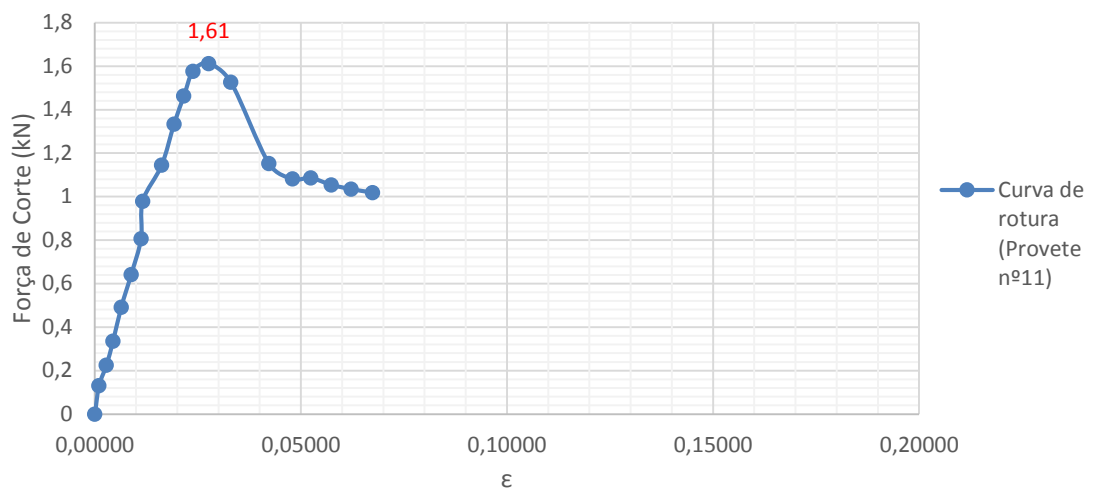


Figura Anexo C 5-Provete nº11 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 5**

Identificação do Provete:

Provete nº10

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,4 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):100 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,6(mm)Diâmetro:101,3(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	Desl.horiz. (div)	(Ângulo)	Leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0		0,00	0,000	0,0000	8011,8	0,000	0
15	24	11,16	0,020	0,0024	8011,8	0,110	14
30	54	16,75	0,040	0,0053	8011,7	0,189	24
45	84	20,90	0,064	0,0083	8011,6	0,283	35
60	108	23,71	0,100	0,0107	8011,5	0,425	53
75	128	25,82	0,140	0,0126	8011,4	0,582	73
90	145	27,49	0,183	0,0143	8011,3	0,751	94
105	161	28,97	0,228	0,0159	8011,2	0,928	116
120	176	30,30	0,280	0,0174	8011,1	1,132	141
135	188	31,32	0,322	0,0186	8011,1	1,297	162
150	198	32,15	0,369	0,0195	8011,0	1,482	185
165	207	32,87	0,408	0,0204	8010,9	1,635	204
180	215	33,51	0,445	0,0212	8010,9	1,781	222
195	223	34,13	0,494	0,0220	8010,8	1,973	246
210	231	34,74	0,530	0,0228	8010,8	2,115	264
225	244	35,71	0,590	0,0241	8010,7	2,351	293
240	269	37,51	0,632	0,0266	8010,4	2,516	314
255	305	39,97	0,520	0,0301	8010,1	2,075	259
270	370	44,07	0,320	0,0365	8009,4	1,289	161
285	400	45,85	0,280	0,0395	8009,1	1,132	141
300	415	46,71	0,294	0,0410	8008,9	1,187	148
315	430	47,56	0,287	0,0424	8016,8	1,160	145
330	455	48,94	0,291	0,0449	8015,2	1,176	147
345	481	50,34	0,292	0,0475	8011,4	1,179	147
360	501	51,40	0,290	0,0495	8008,7	1,172	146
375	519	52,33	0,288	0,0512	8006,6	1,164	145
390	534	53,09	0,288	0,0527	8005,6	1,164	145

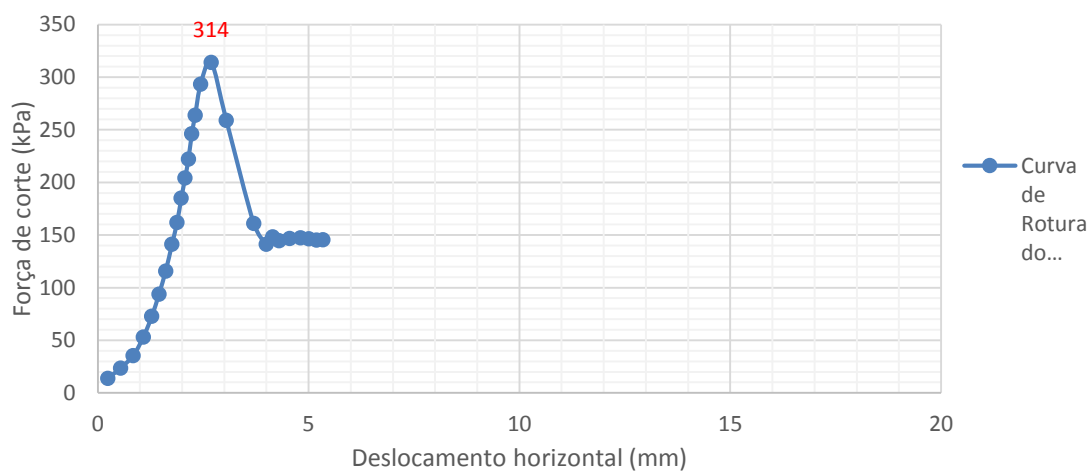
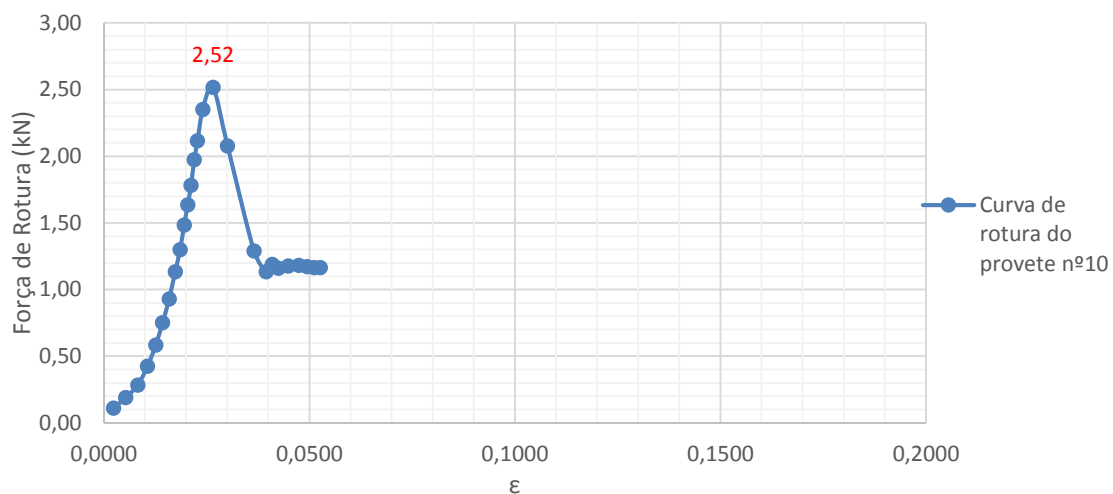


Figura Anexo C.6-Provete nº10 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 6**

Identificação do Provete: Provete nº9

Identificação da Mistura: MB5,0%

Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa: 0,5 Kg/m<sup>2</sup>

Tensão Normal ( $\sigma$ ): 200 kPa

Características do  
provete: Raio:50,6(mm) Diâmetro:101,2(mm<sup>2</sup>) Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel(mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,0	0	0,0000	8011,8	0,00	0,0
15	18	9,7	0,032	0,0018	8009,8	0,16	19,7
30	40	14,4	0,062	0,0040	8005,2	0,28	34,4
45	57	17,2	0,113	0,0056	8000,6	0,48	59,5
60	75	19,8	0,161	0,0074	7995,0	0,66	83,1
75	92	21,9	0,208	0,0091	7989,1	0,85	106,3
90	110	23,9	0,263	0,0109	7982,3	1,07	133,5
105	126	25,6	0,31	0,0125	7975,9	1,25	156,7
120	141	27,1	0,361	0,0139	7969,6	1,45	182,0
135	158	28,7	0,426	0,0156	7962,1	1,71	214,3
150	170	29,8	0,47	0,0168	7956,6	1,88	236,2
165	185	31,1	0,53	0,0183	7949,5	2,11	266,0
180	198	32,2	0,581	0,0196	7943,2	2,32	291,5
195	213	33,4	0,621	0,0210	7935,8	2,47	311,5
210	232	34,8	0,635	0,0229	7926,1	2,53	319,1
225	272	37,7	0,447	0,0269	7904,9	1,79	226,3
240	308	40,2	0,419	0,0304	7885,1	1,68	212,9
255	330	41,6	0,417	0,0326	7872,6	1,67	212,2
270	350	42,9	0,419	0,0346	7861,1	1,68	213,5
285	372	44,2	0,424	0,0368	7848,3	1,70	216,4
300	395	45,6	0,421	0,0390	7834,8	1,69	215,2
315	418	46,9	0,415	0,0413	7821,1	1,66	212,6
330	432	47,7	0,416	0,0427	7812,7	1,67	213,3
345	455	49,0	0,42	0,0450	7798,9	1,68	215,7
360	469	49,7	0,419	0,0463	7790,4	1,68	215,5
375	483	50,5	0,419	0,0477	7781,9	1,68	215,7
	501	51,4	0,418	0,0495	7770,9	1,67	215,5

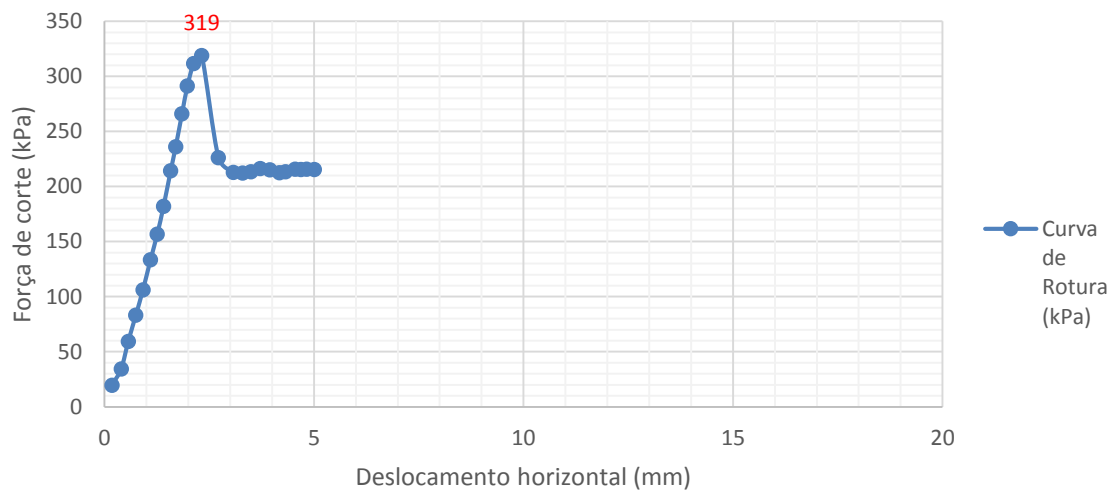
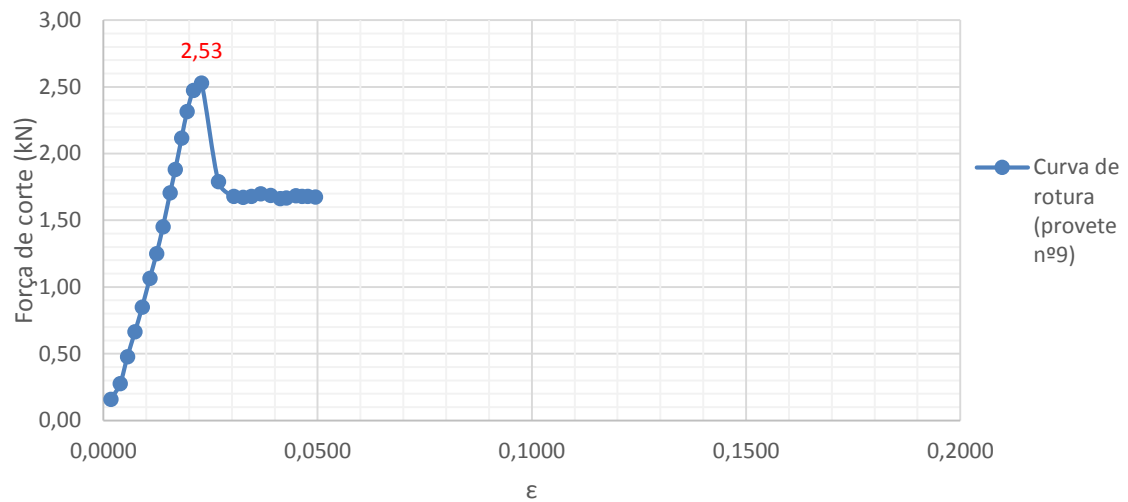


Figura Anexo C.7-Provete n°9 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 7**

Identificação do Provete:

Provete nº 8\*

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,4 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):200 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,5(mm)Diâmetro:101(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\varepsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,0000	8011,8	0,00	0
15	9	6,84	0,033	0,0009	8011,5	0,16	20
30	30	12,50	0,07	0,0030	8009,7	0,31	38
45	51	16,30	0,128	0,0050	8007,0	0,53	67
60	70	19,10	0,162	0,0069	8004,1	0,67	84
75	92	21,91	0,209	0,0091	8000,3	0,85	107
90	108	23,74	0,259	0,0107	7997,2	1,05	131
105	125	25,55	0,315	0,0124	7993,7	1,27	159
120	139	26,95	0,364	0,0138	7990,6	1,46	183
135	155	28,46	0,428	0,0153	7986,9	1,71	215
150	168	29,64	0,477	0,0166	7983,8	1,91	239
165	179	30,60	0,534	0,0177	7981,1	2,13	267
180	190	31,53	0,583	0,0188	7978,3	2,32	291
195	201	32,44	0,638	0,0199	7975,4	2,54	318
210	211	33,24	0,67	0,0209	7972,7	2,66	334
225	226	34,41	0,675	0,0224	7968,6	2,68	337
240	288	38,89	0,463	0,0285	7950,6	1,85	233
255	320	41,01	0,432	0,0317	7940,7	1,73	218
270	340	42,29	0,419	0,0337	7934,2	1,68	212
285	366	43,90	0,408	0,0362	7925,7	1,64	206
300	389	45,27	0,398	0,0385	7918,0	1,60	202
315	416	46,84	0,395	0,0412	7908,7	1,58	200
330	455	49,02	0,392	0,0450	7895,0	1,57	199
345	481	50,42	0,384	0,0476	7885,6	1,54	195
360	506	51,74	0,374	0,0501	7876,5	1,50	191

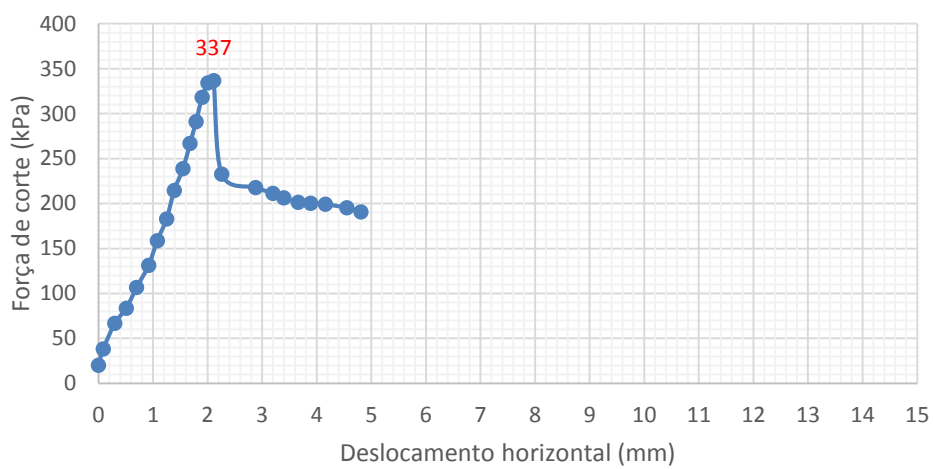
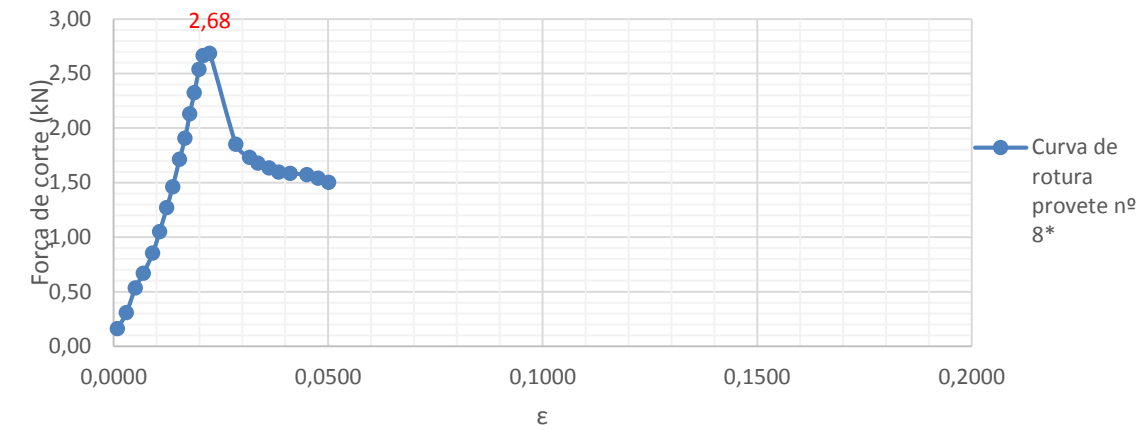


Figura Anexo C.8-Provete nº8 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 8**

Identificação do Provete:

Provete nº 2

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):200 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,7(mm)Diâmetro:101,3(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0,000	0,0000	8011,8	0,00	0
15	15	8,83	0,008	0,0015	8011,1	0,06	8
30	36	13,69	0,027	0,0036	8009,0	0,14	17
45	59	17,53	0,057	0,0058	8005,8	0,26	32
60	78	20,17	0,103	0,0077	8002,8	0,44	55
75	97	22,50	0,163	0,0096	7999,3	0,67	84
90	114	24,39	0,201	0,0113	7995,9	0,82	103
105	131	26,16	0,247	0,0129	7992,3	1,00	125
120	148	27,81	0,293	0,0146	7988,5	1,18	148
135	164	29,28	0,343	0,0162	7984,7	1,38	173
150	178	30,52	0,397	0,0176	7981,2	1,59	199
165	193	31,78	0,449	0,0191	7977,4	1,80	225
180	206	32,84	0,5	0,0203	7974,0	2,00	250
195	219	33,87	0,55	0,0216	7970,4	2,19	275
210	232	34,87	0,595	0,0229	7966,8	2,37	298
225	245	35,84	0,647	0,0242	7963,2	2,57	323
240	266	37,36	0,609	0,0263	7957,0	2,43	305
255	308	40,23	0,495	0,0304	7944,2	1,98	249
270	341	42,35	0,433	0,0337	7933,7	1,73	219
285	370	44,14	0,407	0,0365	7924,1	1,63	206
300	396	45,68	0,393	0,0391	7915,3	1,58	199
315	420	47,07	0,391	0,0415	7907,0	1,57	198
330	438	48,08	0,382	0,0432	7900,7	1,53	194
345	471	49,88	0,385	0,0465	7888,9	1,54	196
360	498	51,32	0,383	0,0492	7879,0	1,54	195
375	517	52,31	0,385	0,0510	7872,0	1,54	196
390	532	53,07	0,379	0,0525	7866,4	1,52	193

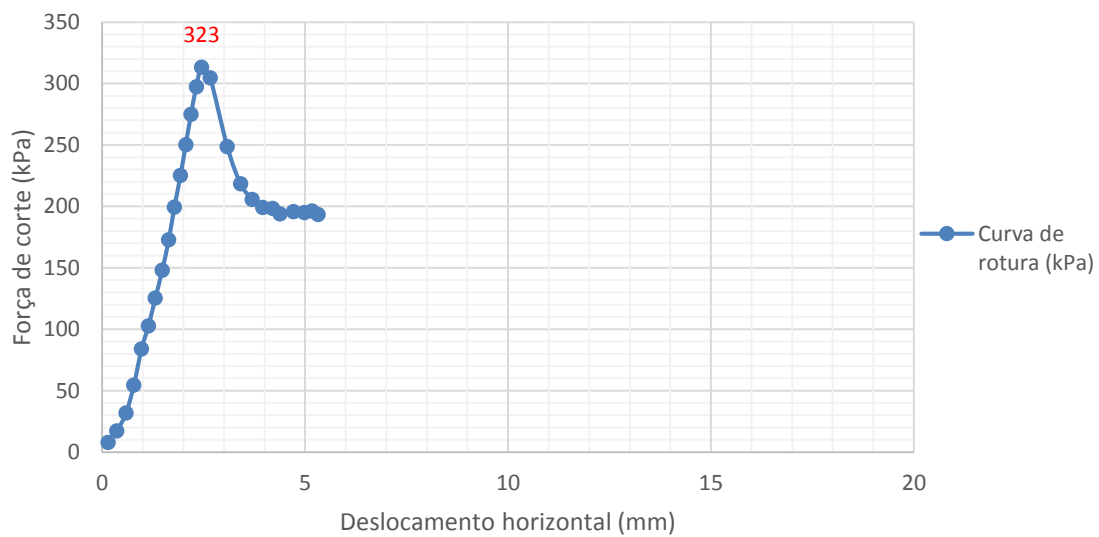
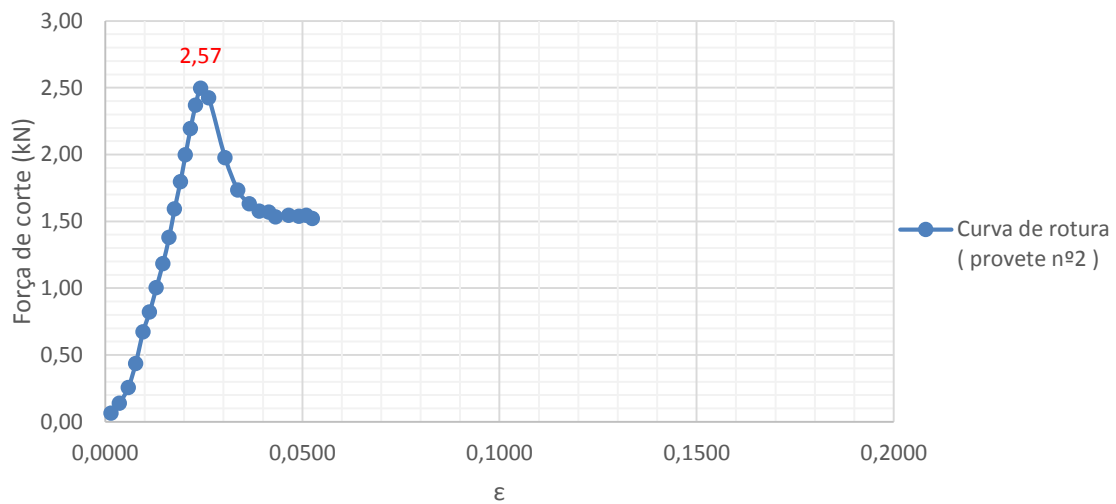


Figura Anexo C.9-Provete nº2 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 9**

Identificação do Provete:

Provete nº 3

Identificação da Mistura:

MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):400 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,5(mm)Diâmetro:101(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,0	0,000	0,0000	8011,8	0	0
15	13	8,2	0,037	0,0013	8011,2	0,18	22
30	28	12,1	0,094	0,0028	8009,9	0,40	50
45	42	14,8	0,167	0,0042	8008,2	0,69	86
60	55	16,9	0,238	0,0054	8006,4	0,97	121
75	68	18,8	0,300	0,0067	8004,4	1,21	151
90	84	20,9	0,358	0,0083	8001,7	1,44	180
105	99	22,7	0,405	0,0098	7998,9	1,62	203
120	115	24,5	0,457	0,0114	7995,8	1,83	229
135	129	26,0	0,511	0,0128	7992,8	2,04	255
150	143	27,3	0,555	0,0142	7989,7	2,21	277
165	156	28,6	0,631	0,0154	7986,7	2,51	314
180	170	29,8	0,690	0,0168	7983,3	2,74	344
195	183	30,9	0,757	0,0181	7980,0	3,01	377
210	195	31,9	0,810	0,0193	7977,0	3,22	403
225	209	33,1	0,870	0,0207	7973,3	3,45	433
240	222	34,1	0,925	0,0220	7969,7	3,67	460
255	238	35,3	0,963	0,0236	7965,3	3,82	479
270	258	36,8	0,970	0,0255	7959,5	3,84	483
285	295	39,4	0,850	0,0292	7948,5	3,37	424
300	332	41,8	0,733	0,0329	7936,8	2,91	367
315	363	43,7	0,733	0,0359	7926,7	2,91	367
330	391	45,4	0,734	0,0387	7917,3	2,92	368
345	415	46,8	0,733	0,0411	7909,1	2,91	368
360	429	47,6	0,731	0,0425	7904,2	2,90	367
375	437	48,0	0,733	0,0433	7901,4	2,91	369
	450	48,7	0,735	0,0446	7896,8	2,92	370

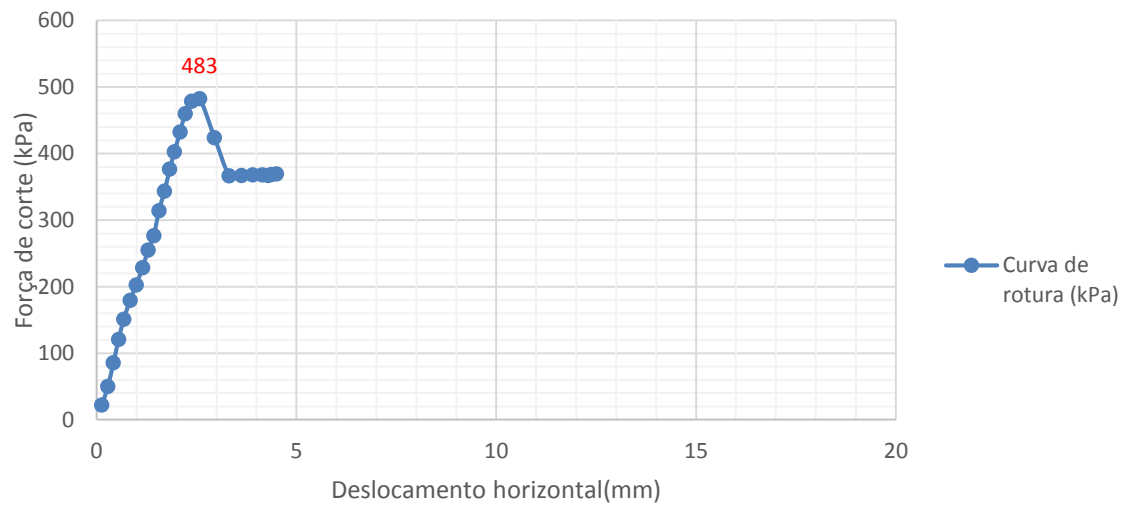
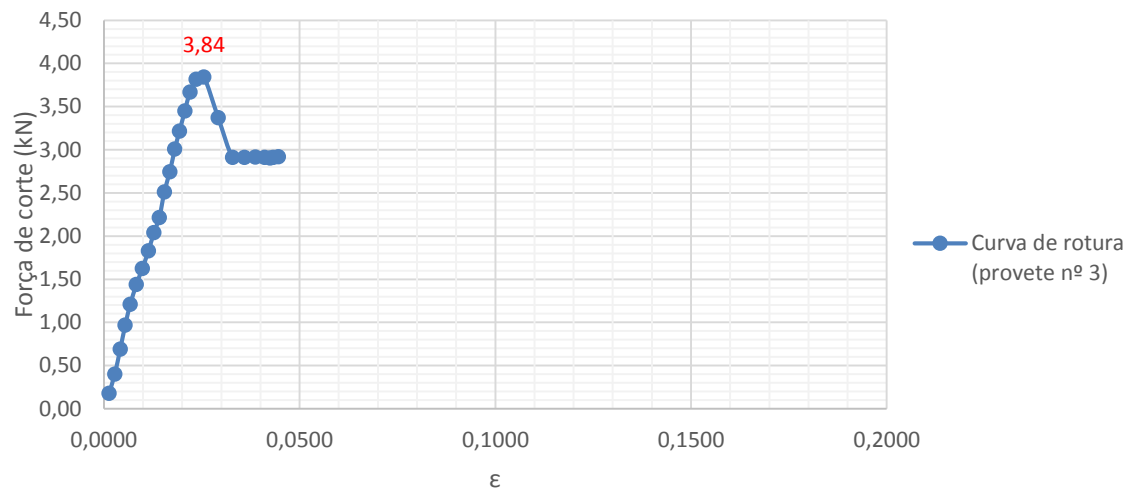


Figura Anexo C.10-Provete nº3 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 10**

Identificação do

Provete nº 4

Provete:

Identificação da

MB5,0%

Mistura:

Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,4 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):400 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,75(mm)Diâmetro:101,5(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,0000	8011,8	0,0	0
15	11	7,55	0,08	0,0011	8011,4	0,3	43
30	26	11,60	0,144	0,0026	8010,1	0,6	75
45	42	14,75	0,215	0,0041	8008,2	0,9	109
60	54	16,73	0,275	0,0053	8006,6	1,1	139
75	69	18,92	0,333	0,0068	8004,3	1,3	167
90	84	20,88	0,384	0,0083	8001,7	1,5	193
105	99	22,67	0,434	0,0098	7998,9	1,7	217
120	115	24,44	0,488	0,0113	7995,7	1,9	244
135	129	25,89	0,545	0,0127	7992,7	2,2	272
150	144	27,36	0,603	0,0142	7989,4	2,4	301
165	158	28,67	0,658	0,0156	7986,1	2,6	328
180	173	30,01	0,717	0,0170	7982,5	2,8	357
195	188	31,29	0,77	0,0185	7978,7	3,1	383
210	203	32,52	0,815	0,0200	7974,8	3,2	406
225	216	33,55	0,854	0,0213	7971,3	3,4	425
240	233	34,86	0,888	0,0230	7966,6	3,5	442
255	251	36,19	0,908	0,0247	7961,4	3,6	452
270	272	37,69	0,916	0,0268	7955,3	3,6	457
285	295	39,26	0,893	0,0291	7948,3	3,5	446
300	325	41,23	0,854	0,0320	7938,9	3,4	427
315	360	43,42	0,798	0,0355	7927,5	3,2	400
330	386	44,98	0,775	0,0380	7918,7	3,1	389
345	406	46,15	0,766	0,0400	7911,9	3,0	385
360	427	47,34	0,758	0,0421	7904,6	3,0	381
375	453	48,78	0,751	0,0446	7895,3	3,0	378
390	474	49,92	0,747	0,0467	7887,8	3,0	376

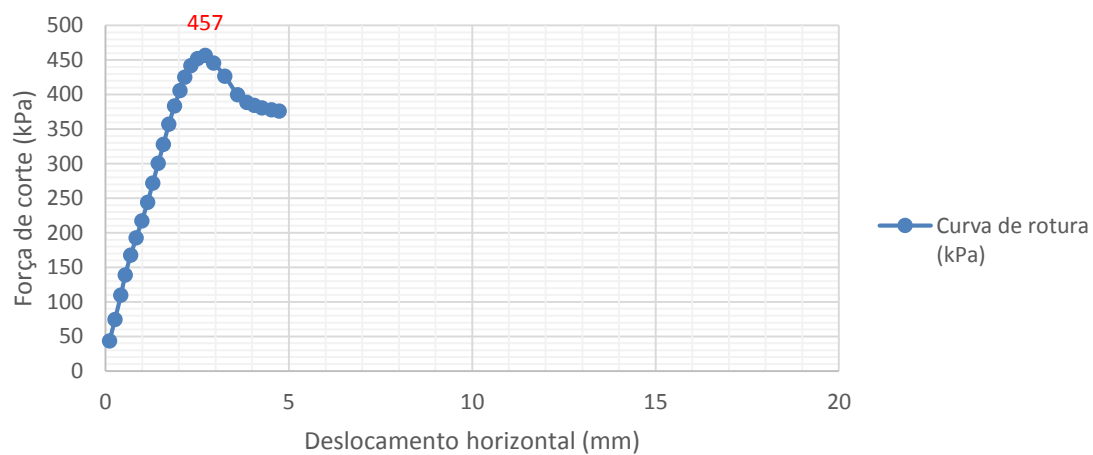
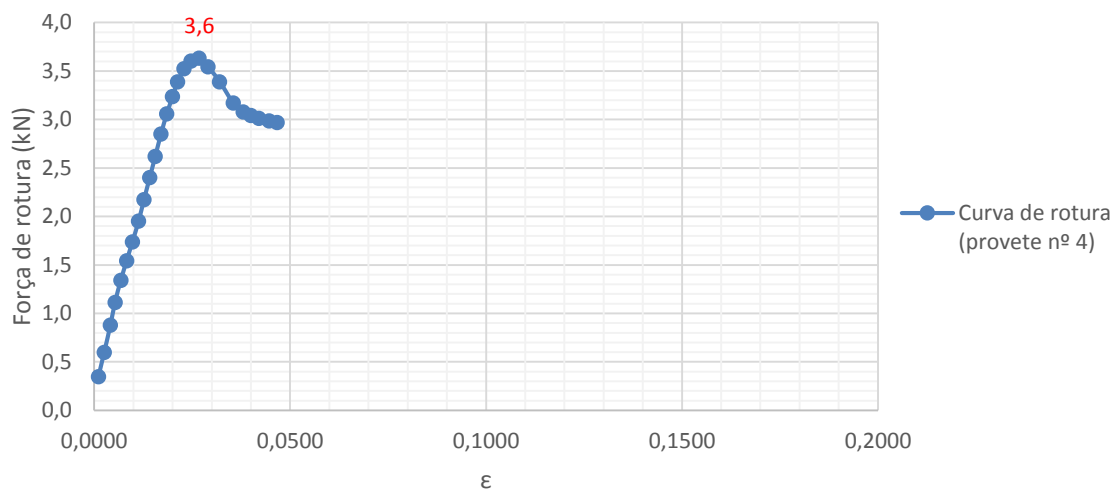


Figura Anexo C. 11-Provete n°4 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 11**Identificação do Provete: Provete nº 6Identificação da Mistura: MB5,0%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa: 0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ): 400 kPaCaracterísticas do  
provete: Raio:50,6(mm) Diâmetro:101,3(mm<sup>2</sup>) Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\varepsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0	8011,8	0	0
15	5	5,09	0,042	0,0005	8011,7	0,20	25
30	16	9,11	0,119	0,0016	8011,0	0,50	62
45	27	11,84	0,175	0,0027	8010,0	0,72	90
60	40	14,41	0,248	0,0039	8008,5	1,01	126
75	55	16,90	0,313	0,0054	8006,4	1,26	158
90	69	18,94	0,369	0,0068	8004,3	1,48	185
105	85	21,02	0,423	0,0084	8001,5	1,69	212
120	100	22,81	0,478	0,0099	7998,7	1,91	239
135	115	24,47	0,53	0,0114	7995,7	2,11	264
150	130	26,02	0,588	0,0128	7992,5	2,34	293
165	143	27,29	0,639	0,0141	7989,6	2,54	318
180	156	28,51	0,696	0,0154	7986,6	2,77	346
195	170	29,77	0,748	0,0168	7983,2	2,97	372
210	185	31,07	0,797	0,0183	7979,5	3,16	397
225	200	32,31	0,833	0,0197	7975,6	3,31	414
240	215	33,51	0,867	0,0212	7971,6	3,44	431
255	235	35,04	0,877	0,0232	7966,1	3,48	437
270	258	36,73	0,844	0,0255	7959,5	3,35	421
285	290	38,96	0,78	0,0286	7949,9	3,10	390
300	315	40,63	0,748	0,0311	7942,1	2,97	374
315	340	42,23	0,725	0,0336	7934,1	2,88	363
330	368	43,95	0,711	0,0363	7924,9	2,83	357
345	385	44,97	0,718	0,0380	7919,2	2,85	360
360	410	46,42	0,698	0,0405	7910,6	2,77	351
375	435	47,84	0,694	0,0429	7901,9	2,76	349
390	459	49,16	0,684	0,0453	7893,3	2,72	345

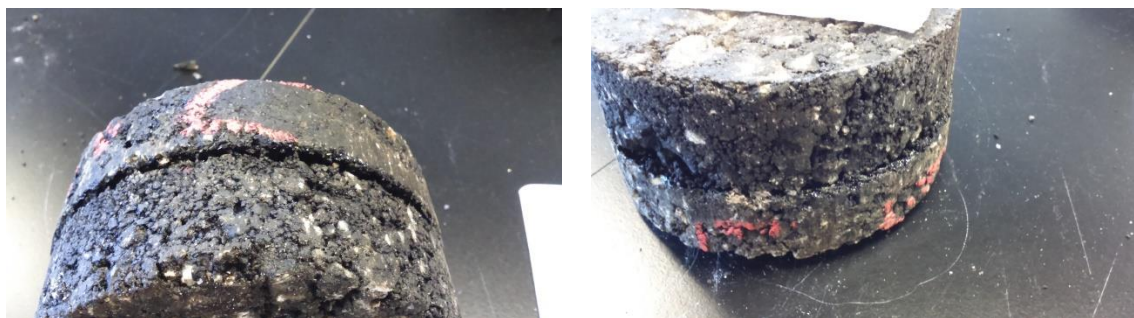
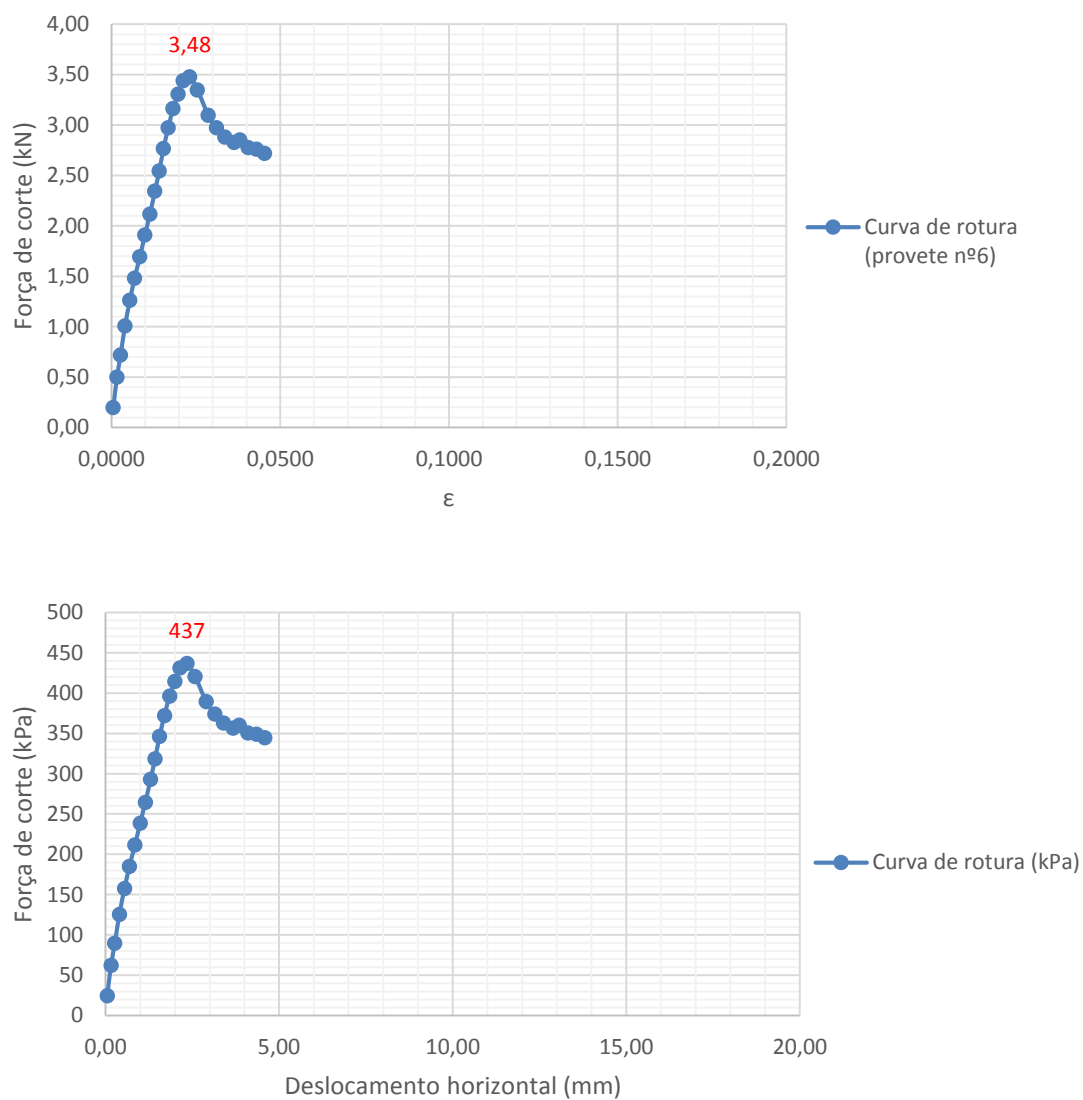


Figura Anexo C.12-Provete n°6 da mistura MB5,0% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 12**

Identificação do

Provete nº 1

Provete:

Identificação da

MB5,5%

Mistura:

Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):50 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,85(mm) Diâmetro:101,7(mm<sup>2</sup>) Área:8123,3(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	Ângulo	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0,000	0,0000	8123,3	0,00	0
15	5	5,08	0,022	0,0005	8123,1	0,12	15
30	13	8,20	0,048	0,0013	8122,7	0,22	27
45	24	11,14	0,077	0,0024	8121,7	0,33	41
60	36	13,64	0,109	0,0035	8120,4	0,46	57
75	48	15,76	0,138	0,0047	8118,9	0,57	71
90	60	17,62	0,169	0,0059	8117,1	0,70	86
105	72	19,31	0,200	0,0071	8115,2	0,82	101
120	83	20,73	0,235	0,0082	8113,3	0,96	118
135	94	22,07	0,270	0,0092	8111,3	1,09	135
150	104	23,22	0,300	0,0102	8109,4	1,21	149
165	116	24,52	0,337	0,0114	8106,9	1,36	167
180	128	25,77	0,373	0,0126	8104,4	1,50	185
195	139	26,85	0,403	0,0137	8101,9	1,62	199
210	152	28,09	0,431	0,0149	8099,0	1,73	213
225	165	29,27	0,463	0,0162	8095,8	1,85	229
240	178	30,41	0,489	0,0175	8092,6	1,95	241
255	200	32,25	0,498	0,0197	8087,0	1,99	246
270	280	38,20	0,350	0,0275	8064,2	1,41	175
285	355	43,07	0,183	0,0349	8040,5	0,75	93
300	392	45,29	0,157	0,0385	8028,0	0,65	81
315	423	47,07	0,146	0,0416	8017,3	0,61	76
330	450	48,57	0,141	0,0442	8007,7	0,59	73
345	478	50,08	0,138	0,0470	7997,6	0,57	72
360	506	51,55	0,131	0,0498	7987,3	0,55	68
375	533	52,94	0,126	0,0524	7977,2	0,53	66
390	562	54,38	0,119	0,0553	7966,3	0,50	63

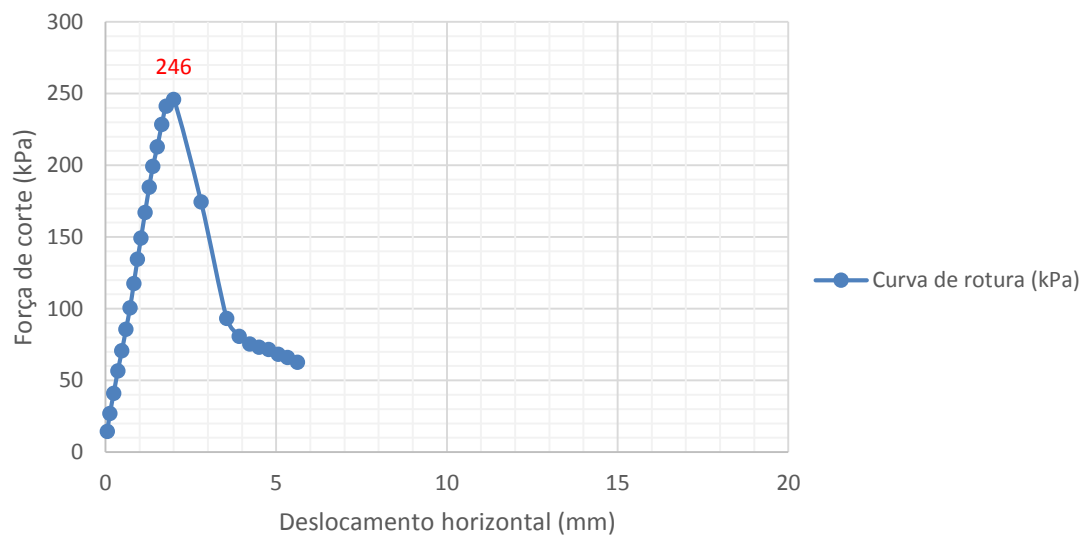
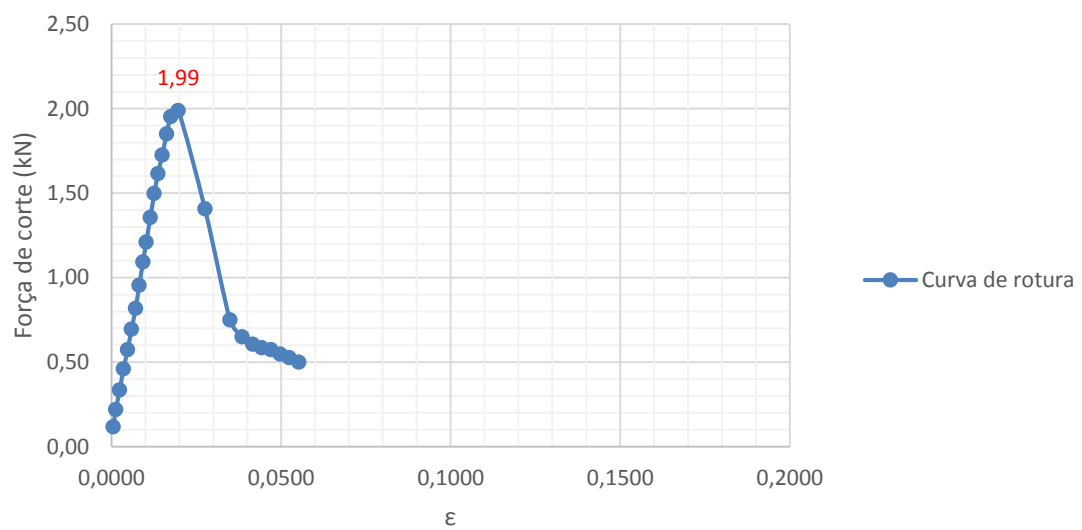


Figura Anexo C. 13-Provete nº1 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 13**

Identificação do

Provete nº 5

Provete:

Identificação da

MB5,5%

Mistura:

Taxa de aplicação

de emulsão

0,4 Kg/m<sup>2</sup>

betuminosa:

Tensão Normal( $\sigma$ ):50 kPa

Características do

provete:

Raio:50,75(mm) Diâmetro:101,5(mm<sup>2</sup>) Área:8091,37(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	Desl.horiz. (div)	(Ângulo)	Leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0,00	0,00000	8091,3	0,00	0
15	5	5,09	0,038	0,0005	8091,2	0,18	22
30	17	9,38	0,063	0,0017	8090,4	0,28	35
45	34	13,27	0,099	0,0033	8088,7	0,42	52
60	49	15,94	0,131	0,0048	8086,8	0,55	68
75	63	18,07	0,167	0,0062	8084,7	0,69	85
90	78	20,12	0,196	0,0077	8082,3	0,80	99
105	92	21,85	0,232	0,0091	8079,8	0,94	117
120	105	23,35	0,264	0,0103	8077,3	1,07	132
135	120	24,97	0,3	0,0118	8074,2	1,21	150
150	132	26,19	0,331	0,0130	8071,6	1,33	165
165	146	27,55	0,365	0,0144	8068,5	1,47	182
180	161	28,94	0,39	0,0159	8064,9	1,56	194
195	177	30,35	0,409	0,0174	8061,0	1,64	203
210	200	32,28	0,415	0,0197	8055,1	1,66	206
225	252	36,26	0,3	0,0248	8040,7	1,21	151
240	317	40,72	0,169	0,0312	8020,9	0,70	87
255	348	42,68	0,151	0,0343	8010,9	0,63	78
270	372	44,15	0,145	0,0367	8003,0	0,60	75
285	398	45,68	0,145	0,0392	7994,2	0,60	75
300	419	46,89	0,151	0,0413	7986,9	0,625	78
315	444	48,29	0,152	0,0437	7978,1	0,629	79
330	470	49,71	0,157	0,0463	7968,7	0,649	81
345	498	51,19	0,16	0,0491	7958,5	0,661	83
360	517	52,17	0,167	0,0509	7951,5	0,688	87
375	541	53,39	0,169	0,0533	7942,5	0,696	88
390	561	54,39	0,175	0,0553	7934,9	0,720	91

405	588	55,71	0,177	0,0579	7924,6	0,727	92
420	614	56,95	0,175	0,0605	7914,5	0,720	91
435	637	58,03	0,175	0,0628	7905,5	0,720	91

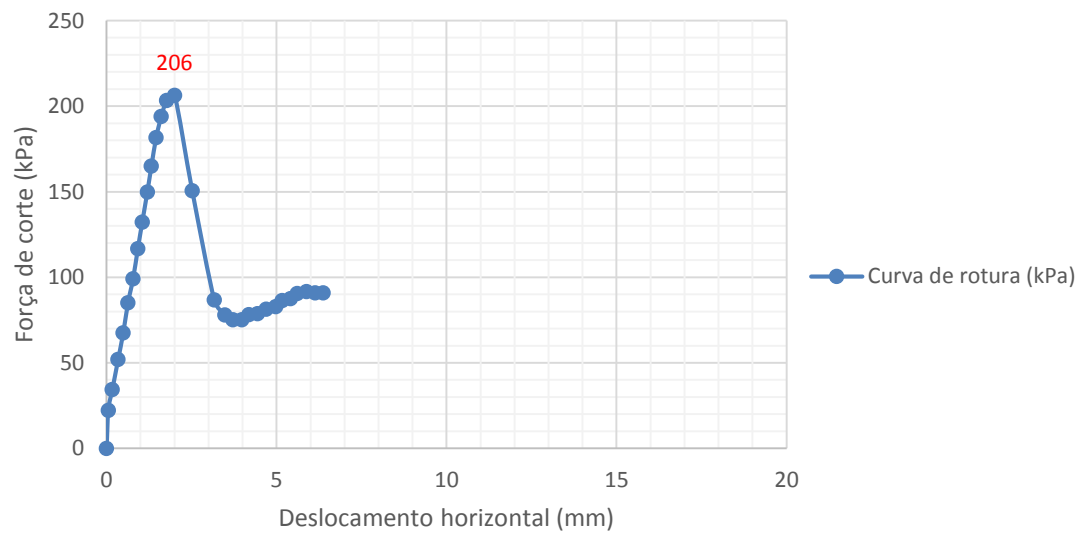
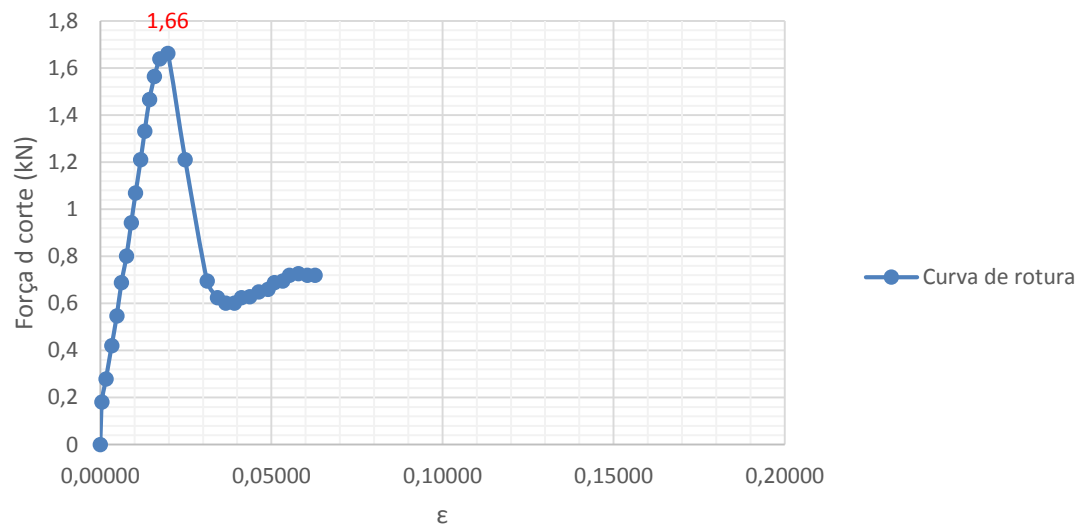


Figura Anexo C. 14-Provete nº5 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 14**

Identificação do Provete:

Provete nº 9

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):50 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,4(mm)Diâmetro:100,8(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (div)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0				
15	5	5,09	0,032	0,0010	8011,7	0,16	20
30	15	8,81	0,065	0,0030	8011,1	0,29	36
45	26	11,60	0,098	0,0052	8010,1	0,42	52
60	39	14,22	0,131	0,0078	8008,6	0,55	68
75	52	16,42	0,17	0,0104	8006,9	0,70	87
90	63	18,07	0,211	0,0126	8005,3	0,86	108
105	76	19,86	0,25	0,0152	8003,2	1,01	127
120	88	21,37	0,291	0,0176	8001,1	1,18	147
135	101	22,90	0,333	0,0202	7998,6	1,34	168
150	114	24,33	0,367	0,0228	7996,0	1,47	184
165	130	25,99	0,41	0,0260	7992,7	1,64	206
180	154	28,30	0,37	0,0308	7987,2	1,49	186
195	177	30,35	0,108	0,0354	7981,7	0,46	57
210	204	32,60	0,106	0,0408	7974,8	0,45	56
225	238	35,23	0,108	0,0476	7965,5	0,46	57
240	282	38,38	0,111	0,0564	7952,7	0,47	59
255	304	39,86	0,115	0,0608	7945,9	0,48	61
270	352	42,93	0,119	0,0704	7930,7	0,50	63
285	396	45,57	0,124	0,0792	7916,0	0,52	66
300	422	47,06	0,124	0,0844	7907,0	0,52	66
315	448	48,51	0,123	0,0896	7897,9	0,52	65
330	471	49,76	0,121	0,0942	7889,7	0,51	64
345	495	51,03	0,121	0,0990	7881,0	0,51	64
360	519	52,28	0,124	0,1038	7872,2	0,52	66
375	546	53,64	0,119	0,1092	7862,1	0,50	64

390	577	55,17	0,113	0,1154	7850,4	0,48	61
405	598	56,19	0,112	0,1196	7842,3	0,47	60
420	620	57,24	0,109	0,1240	7833,9	0,46	59

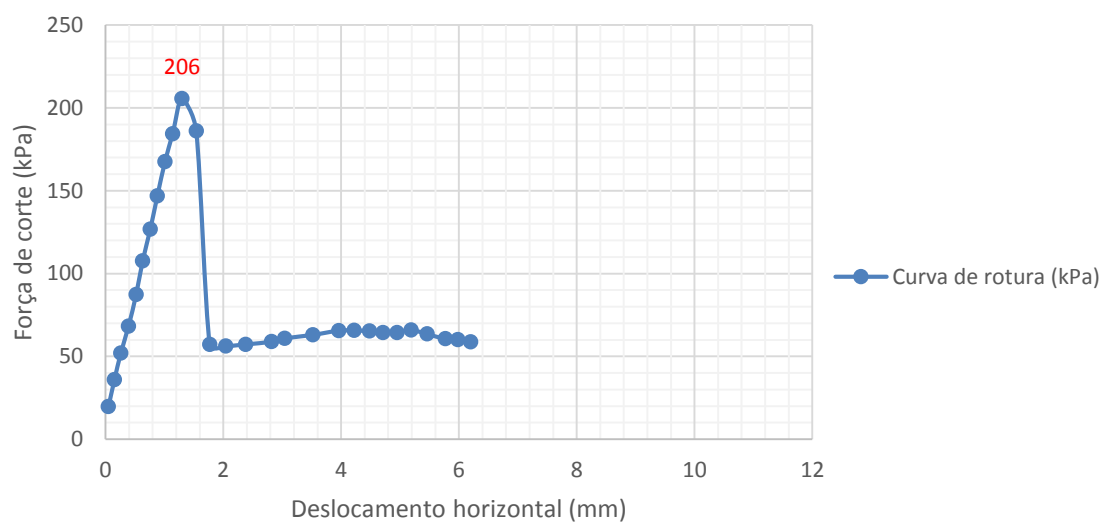
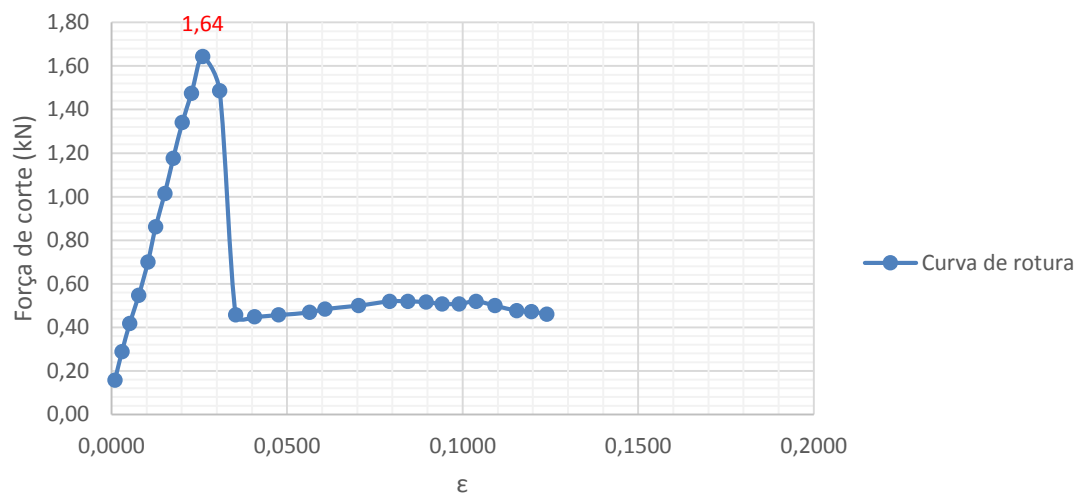


Figura Anexo C. 15-Provete nº9 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 15**

Identificação do Provete:

Provete nº 11

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):100 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,35(mm)Diâmetro:100,7(mm<sup>2</sup>)Área:7964(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\varepsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,0	0,000	0,0000	7964	0,00	0
15	7	6,1	0,031	0,0007	7964,1	0,15	19
30	17	9,5	0,057	0,0017	7963,4	0,26	32
45	28	12,1	0,087	0,0028	7962,4	0,37	47
60	38	14,1	0,125	0,0038	7961,2	0,52	66
75	51	16,4	0,165	0,0051	7959,5	0,68	85
90	63	18,2	0,208	0,0063	7957,8	0,85	107
105	75	19,9	0,244	0,0074	7955,8	0,99	125
120	88	21,5	0,286	0,0087	7953,5	1,16	145
135	101	23,1	0,329	0,0100	7951,1	1,32	167
150	115	24,6	0,371	0,0114	7948,3	1,49	187
165	125	25,7	0,397	0,0124	7946,2	1,59	200
180	140	27,2	0,419	0,0139	7942,9	1,68	211
195	163	29,3	0,456	0,0162	7937,6	1,82	230
210	190	31,7	0,391	0,0189	7930,9	1,57	198
225	216	33,8	0,369	0,0214	7924,1	1,48	187
240	252	36,5	0,331	0,0250	7914,0	1,33	168
255	294	39,5	0,256	0,0292	7901,6	1,04	131
270	325	41,5	0,231	0,0323	7892,0	0,94	119
285	353	43,3	0,218	0,0351	7883,0	0,89	113
300	381	45,0	0,212	0,0378	7873,7	0,865	110

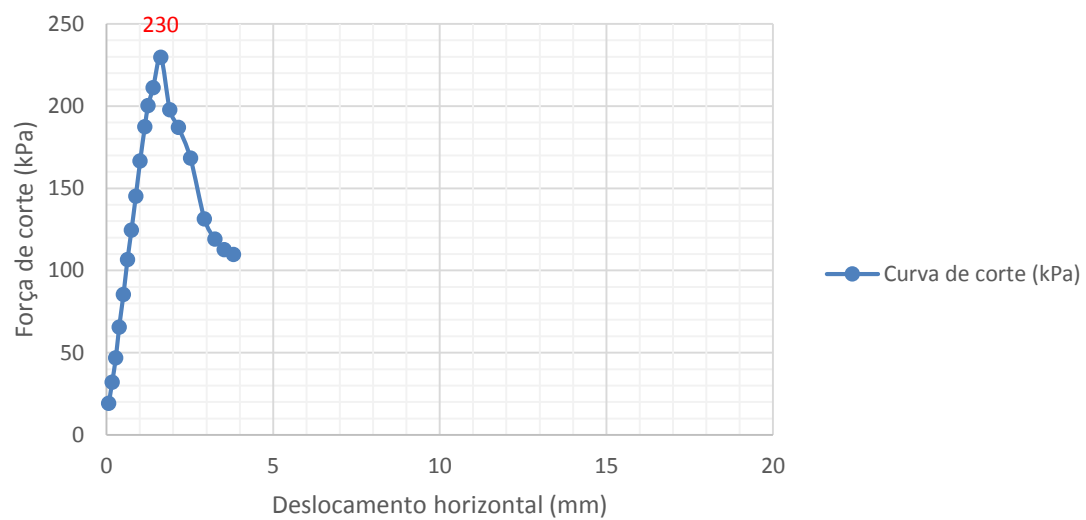
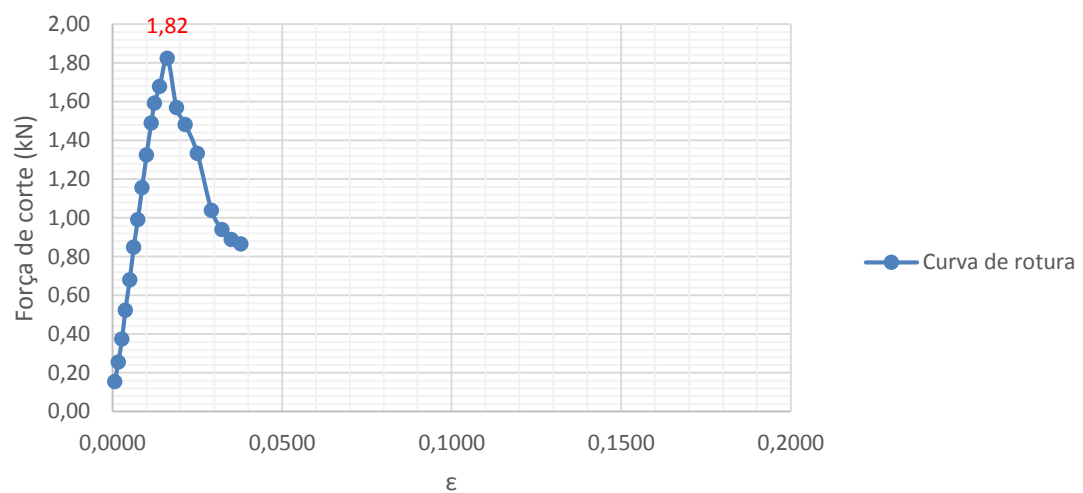


Figura Anexo C. 16-Provete n°11 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 16**

Identificação do Provete:

Provete nº 13

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,4 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):100 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,35(mm)Diâmetro:100,7(mm<sup>2</sup>)Área:7964(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\varepsilon$	A	T
0	0	0,00	0	0,0000	7964,0	0
15	4	4,57	0,074	0,0004	7964,3	0,3
30	13	8,24	0,127	0,0013	7964,3	0,5
45	23	10,96	0,174	0,0023	7964,3	0,7
60	33	13,13	0,223	0,0033	7964,3	0,9
75	42	14,81	0,261	0,0042	7964,2	1,1
90	51	16,32	0,297	0,0051	7964,2	1,2
105	64	18,29	0,341	0,0064	7964,2	1,4
120	74	19,67	0,377	0,0073	7964,1	1,5
135	88	21,46	0,417	0,0087	7964,1	1,7
150	100	22,88	0,447	0,0099	7964,0	1,8
165	114	24,43	0,468	0,0113	7964,0	1,9
180	135	26,60	0,479	0,0134	7963,9	1,9
195	167	29,60	0,463	0,0166	7963,7	1,9
210	202	32,57	0,418	0,0201	7963,4	1,7
225	235	35,15	0,378	0,0233	7963,2	1,5
240	280	38,40	0,287	0,0278	7962,8	1,2
255	318	40,94	0,233	0,0316	7962,4	0,9
270	341	42,42	0,217	0,0339	7962,2	0,9
285	372	44,33	0,207	0,0369	7961,9	0,8
300	398	45,87	0,199	0,0395	7961,5	0,8
315	420	47,14	0,196	0,0417	7969,2	0,8
330	442	48,37	0,198	0,0439	7968,5	0,8
345	459	49,31	0,198	0,0456	7966,8	0,8
360	471	49,96	0,196	0,0468	7965,2	0,8
375	489	50,92	0,193	0,0486	7962,4	0,8
390	508	51,92	0,19	0,0504	7959,9	0,8

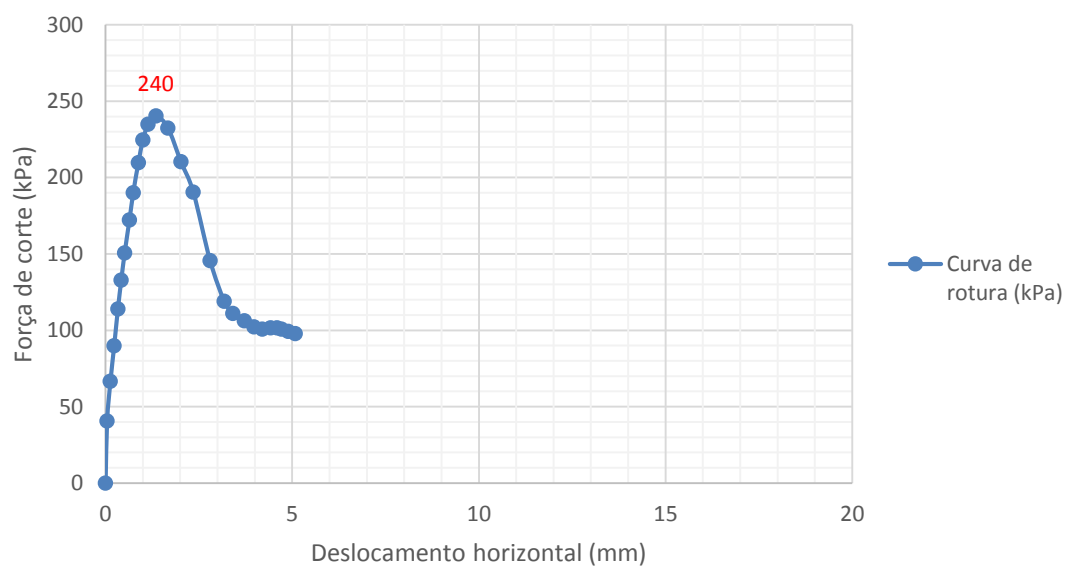
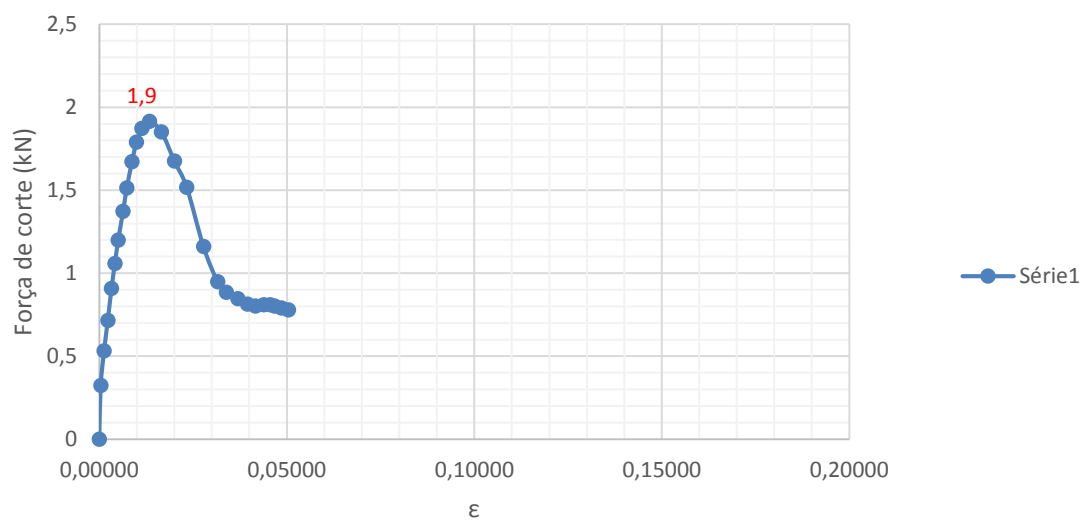


Figura Anexo C. 17-Provete nº13 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 17**

Identificação do Provete: Provete nº 4

Identificação da Mistura: MB5,5%

Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa: 0,3 Kg/m<sup>2</sup>

Tensão Normal ( $\sigma$ ): 100 kPa

Características do  
provete: Raio:50,5(mm) Diâmetro:101,0(mm<sup>2</sup>) Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.hori z. (div)	(Ângulo)	leitura anel (div)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,00000	8011,8	0,00	0
15	6	5,59	0,054	0,0006	7964,3	0,24	31
30	16	9,14	0,093	0,0016	7964,3	0,40	50
45	26	11,65	0,133	0,0026	7964,3	0,55	70
60	39	14,27	0,176	0,0039	7964,3	0,72	91
75	50	16,16	0,207	0,0050	7964,2	0,85	106
90	63	18,15	0,247	0,0062	7964,2	1,00	126
105	75	19,80	0,283	0,0074	7964,1	1,14	144
120	84	20,96	0,315	0,0083	7964,1	1,27	159
135	97	22,53	0,344	0,0096	7964,1	1,38	174
150	111	24,11	0,378	0,0110	7964,0	1,52	191
165	130	26,10	0,411	0,0129	7963,9	1,65	207
180	163	29,24	0,350	0,0161	7963,7	1,41	177
195	205	32,81	0,281	0,0203	7963,4	1,14	143
210	247	36,04	0,209	0,0245	7963,1	0,85	107
225	276	38,12	0,193	0,0273	7962,8	0,79	99
240	308	40,29	0,178	0,0305	7962,5	0,73	92
255	333	41,91	0,177	0,0330	7962,3	0,73	91
270	358	43,47	0,164	0,0354	7962,0	0,68	85
285	385	45,10	0,159	0,0381	7961,7	0,66	82
300	408	46,45	0,162	0,0404	7961,4	0,67	84
315	435	47,98	0,160	0,0431	7961,1	0,66	83
330	460	49,36	0,158	0,0455	7960,7	0,65	82
345	487	50,82	0,161	0,0482	7962,7	0,66	83
360	506	51,81	0,159	0,0501	7960,2	0,66	83
375	524	52,74	0,159	0,0519	7958,5	0,66	83
390	542	53,66	0,158	0,0537	7958,0	0,65	82

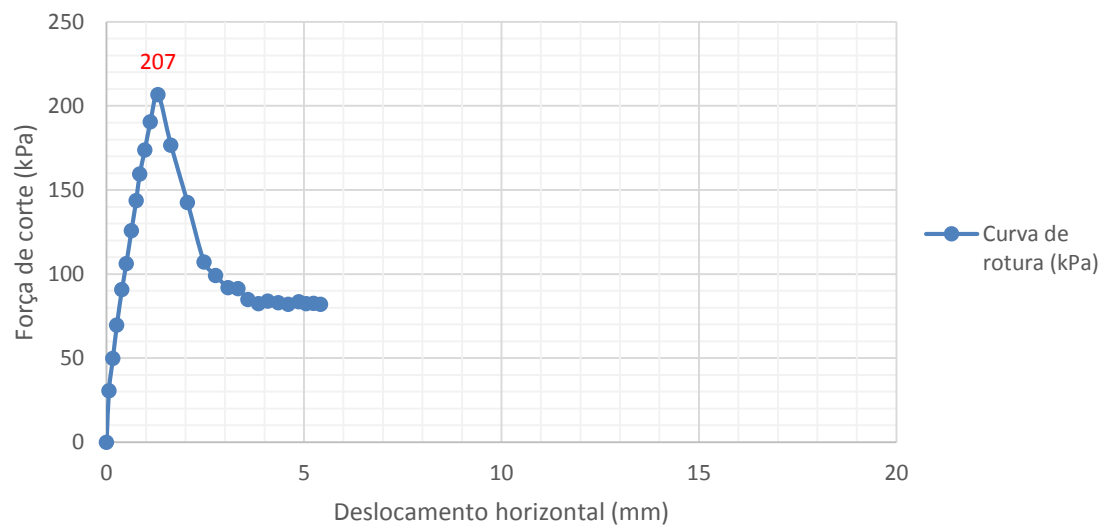
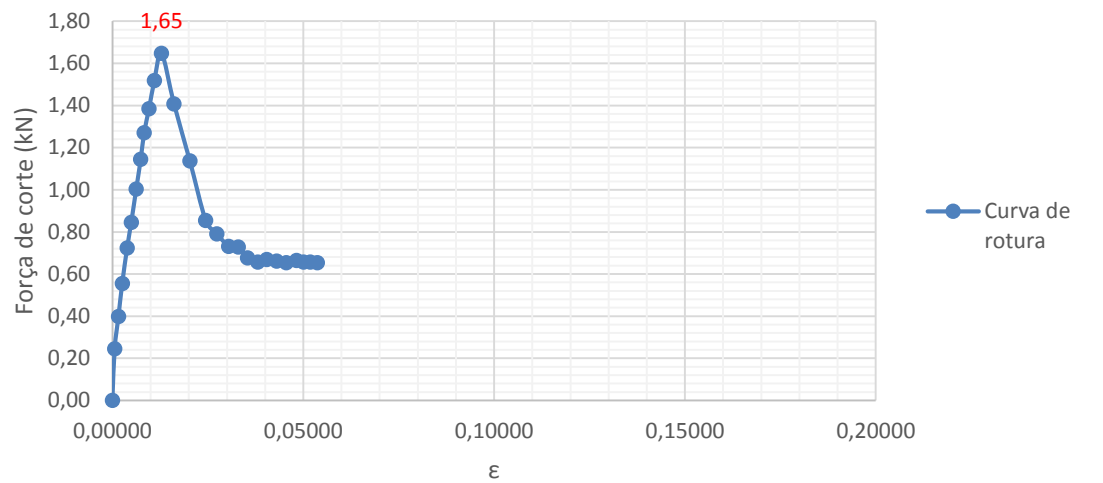


Figura Anexo C. 18-Provete nº4 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 18**

Identificação do Provete:

Provete nº 14

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):200 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,6(mm)Diâmetro:101,2(mm<sup>2</sup>)Área:8043(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	Ângulo	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	9	6,9	0,036	0,00000	8043,0	0	0
15	20	10,2	0,064	0,0020	8041,2	0,3	35
30	31	12,7	0,091	0,0031	8039,0	0,4	48
45	44	15,1	0,116	0,0043	8035,9	0,5	61
60	57	17,2	0,147	0,0056	8032,3	0,6	76
75	70	19,1	0,184	0,0069	8028,4	0,8	94
90	83	20,8	0,223	0,0082	8024,0	0,9	113
105	97	22,5	0,264	0,0096	8019,0	1,1	133
120	111	24,0	0,311	0,0110	8013,7	1,3	156
135	123	25,3	0,356	0,0122	8008,9	1,4	179
150	137	26,7	0,403	0,0135	8003,1	1,6	202
165	150	28,0	0,447	0,0148	7997,4	1,8	224
180	165	29,3	0,498	0,0163	7990,7	2,0	249
195	175	30,2	0,539	0,0173	7986,0	2,2	269
210	189	31,4	0,577	0,0187	7979,4	2,3	288
225	201	32,4	0,612	0,0199	7973,5	2,4	306
240	216	33,6	0,652	0,0213	7966,1	2,6	326
255	228	34,5	0,688	0,0225	7959,9	2,7	344
270	242	35,6	0,723	0,0239	7952,7	2,9	361
285	260	36,9	0,753	0,0257	7943,2	3,0	377
300	276	38,0	0,769	0,0273	7934,5	3,1	385
315	298	39,5	0,781	0,0294	7922,4	3,1	391
330	332	41,7	0,684	0,0328	7903,3	2,7	344
345	392	45,4	0,531	0,0387	7868,3	2,1	269
360	429	47,5	0,483	0,0424	7846,3	1,9	246
375	456	49,0	0,461	0,0451	7830,0	1,8	235
390	483	50,5	0,443	0,0477	7813,6	1,8	227
405	510	51,9	0,432	0,0504	7797,2	1,7	222
420	531	53,0	0,408	0,0525	7784,3	1,6	210
435	558	54,3	0,395	0,0551	7767,8	1,6	204

450	586	55,7	0,382	0,0579	7750,6	1,5	198
465	602	56,5	0,371	0,0595	7740,8	1,5	192

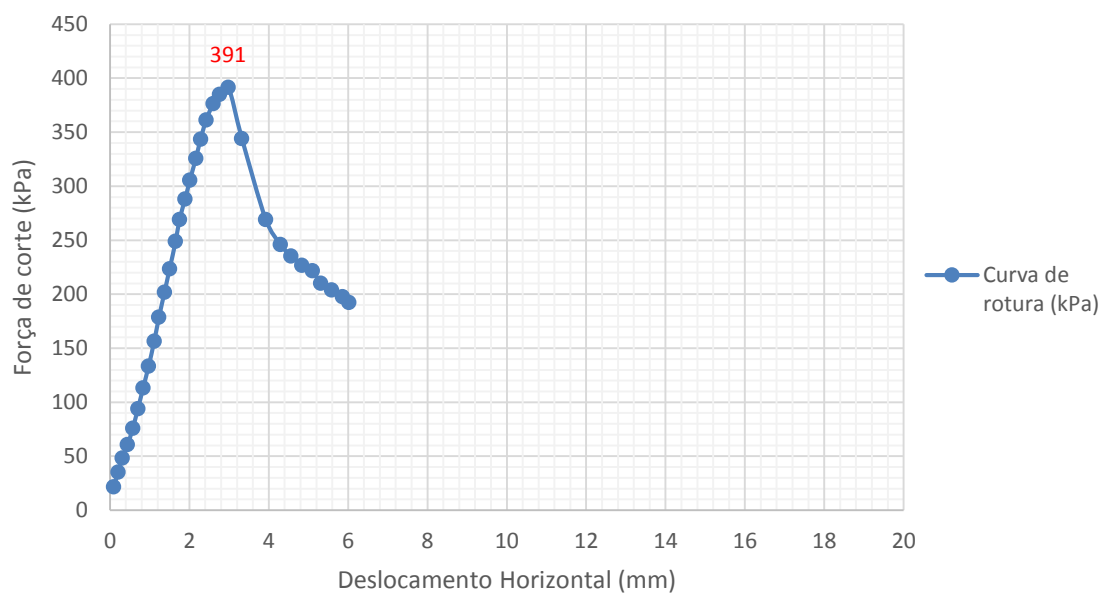
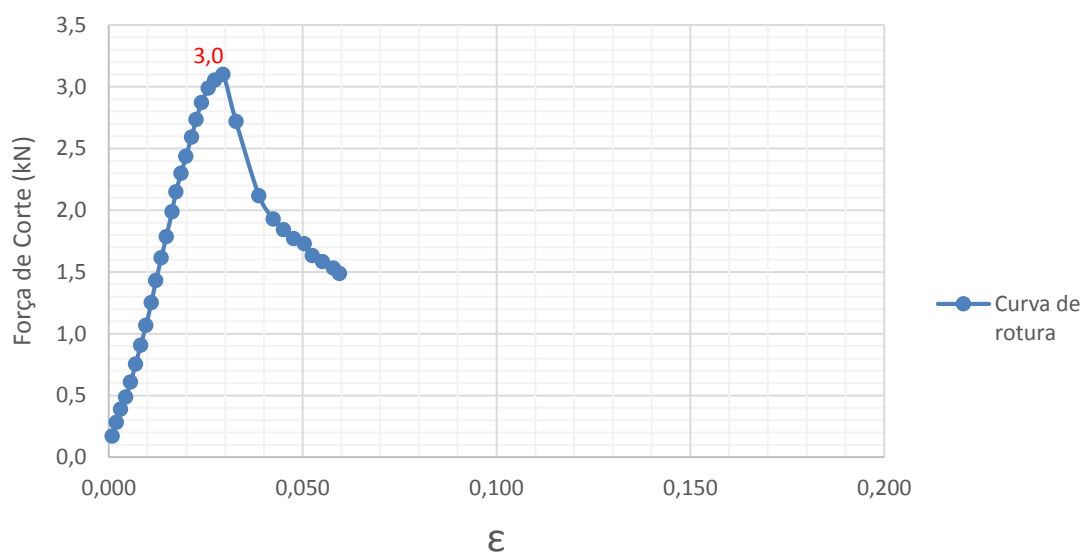


Figura Anexo C. 19-Provete n.º 14 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 19**

Identificação do Provete: Provete nº 12

Identificação da Mistura: MB5,5%

Taxa de aplicação de emulsão betuminosa: 0,4 Kg/m<sup>2</sup>

Tensão Normal ( $\sigma$ ): 200 kPa

Características do provete: Raio:50,4(mm) Diâmetro:100,8(mm<sup>2</sup>) Área:7980(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	Ângulo	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,00000	7980,1	0	0
15	7	6,04	0,036	0,0007	7979,9	0,17	22
30	15	8,84	0,076	0,0015	7979,4	0,33	41
45	24	11,19	0,126	0,0024	7978,6	0,53	66
60	33	13,12	0,173	0,0033	7977,6	0,71	89
75	47	15,66	0,235	0,0047	7975,9	0,96	120
90	55	16,94	0,268	0,0055	7974,8	1,09	136
105	66	18,57	0,309	0,0065	7973,1	1,25	156
120	78	20,19	0,364	0,0077	7971,1	1,46	183
135	91	21,81	0,415	0,0090	7968,8	1,66	209
150	101	22,98	0,461	0,0100	7966,9	1,84	231
165	111	24,09	0,51	0,0110	7964,9	2,04	256
180	123	25,37	0,556	0,0122	7962,4	2,22	278
195	136	26,68	0,604	0,0135	7959,6	2,41	302
210	150	28,03	0,647	0,0149	7956,4	2,57	324
225	164	29,31	0,663	0,0163	7953,1	2,64	332
240	186	31,23	0,675	0,0185	7947,6	2,68	338
255	212	33,35	0,685	0,0210	7940,8	2,72	343
270	245	35,88	0,651	0,0243	7931,7	2,59	327
285	287	38,86	0,583	0,0285	7919,3	2,32	293
300	313	40,60	0,484	0,0311	7911,2	1,93	244
315	324	41,31	0,452	0,0321	7907,8	1,81	229
330	355	43,27	0,42	0,0352	7897,7	1,68	213
345	389	45,32	0,37	0,0386	7886,4	1,49	188
360	422	47,23	0,361	0,0419	7875,1	1,45	184
375	445	48,52	0,358	0,0441	7867,0	1,44	183
390	472	49,99	0,349	0,0468	7857,3	1,40	179

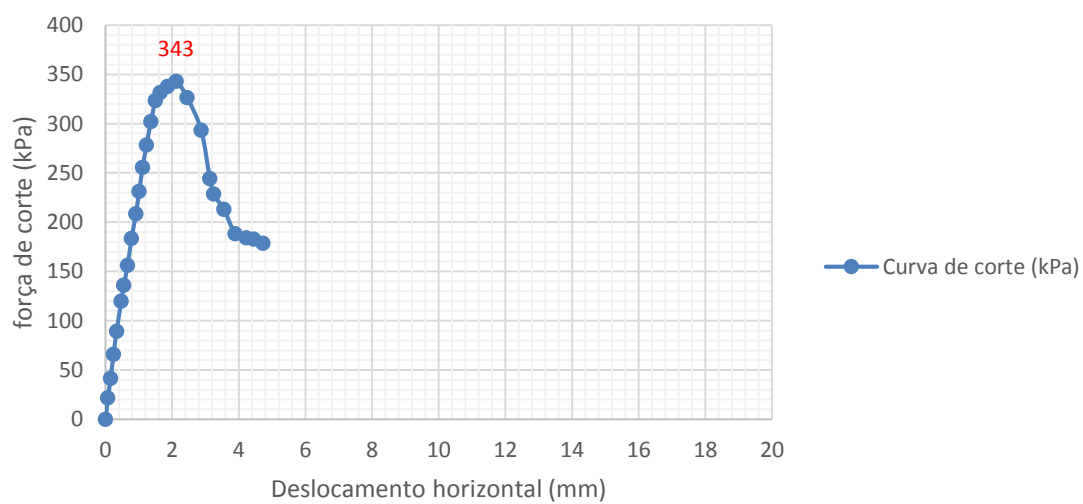
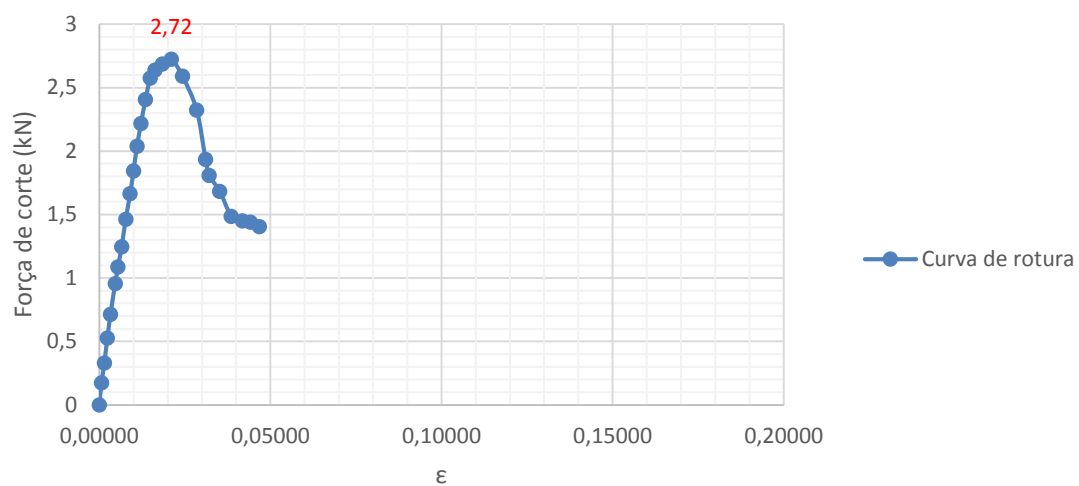


Figura Anexo C. 20-Provete nº12 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 20**

Identificação do Provete:

Provete nº 3

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):200 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,25(mm)Diâmetro:100,5(mm<sup>2</sup>)Área:7933(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,00000	7932,7	0,00	0
15	5	5,10	0,024	0,0005	7932,6	0,13	16
30	16	9,13	0,052	0,0016	7931,9	0,24	30
45	26	11,64	0,091	0,0026	7931,0	0,39	49
60	35	13,51	0,119	0,0035	7930,0	0,50	63
75	48	15,83	0,151	0,0048	7928,3	0,63	79
90	59	17,55	0,19	0,0059	7926,8	0,78	98
105	72	19,39	0,24	0,0072	7924,7	0,98	123
120	84	20,95	0,284	0,0084	7922,6	1,15	145
135	97	22,52	0,329	0,0097	7920,2	1,32	167
150	109	23,88	0,373	0,0108	7917,9	1,50	189
165	124	25,47	0,427	0,0123	7914,8	1,71	216
180	136	26,68	0,474	0,0135	7912,2	1,89	239
195	150	28,03	0,51	0,0149	7909,0	2,04	257
210	165	29,40	0,548	0,0164	7905,5	2,19	276
225	182	30,89	0,572	0,0181	7901,3	2,28	289
240	202	32,55	0,586	0,0201	7896,2	2,33	296
255	232	34,90	0,552	0,0231	7888,0	2,20	279
270	264	37,25	0,492	0,0263	7878,9	1,97	249
285	305	40,07	0,412	0,0303	7866,5	1,65	210
300	338	42,21	0,367	0,0336	7856,1	1,47	188
315	362	43,70	0,353	0,0360	7848,3	1,42	181
330	380	44,78	0,354	0,0378	7842,3	1,42	181
345	402	46,08	0,359	0,0400	7834,8	1,44	184
360	432	47,79	0,357	0,0430	7824,4	1,43	183
375	459	49,28	0,352	0,0457	7814,9	1,42	181
390	476	50,20	0,352	0,0474	7808,8	1,42	181

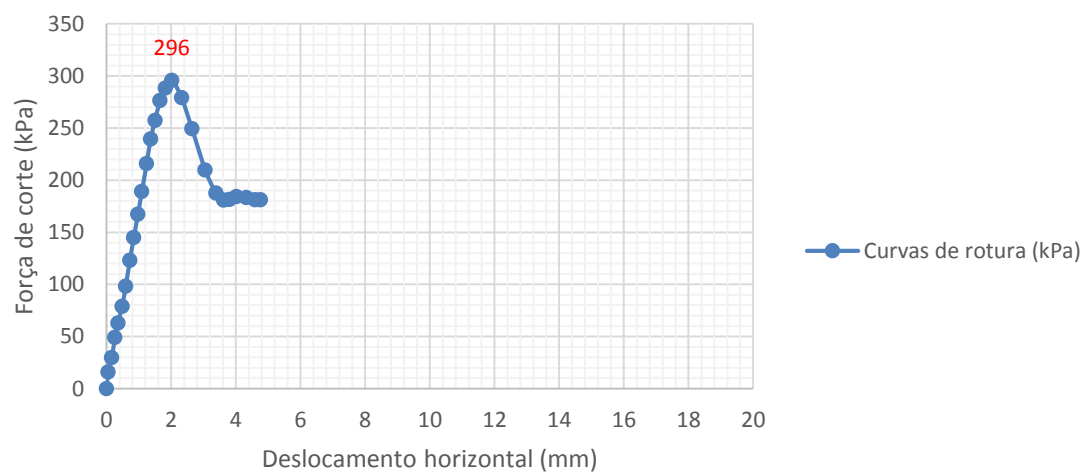
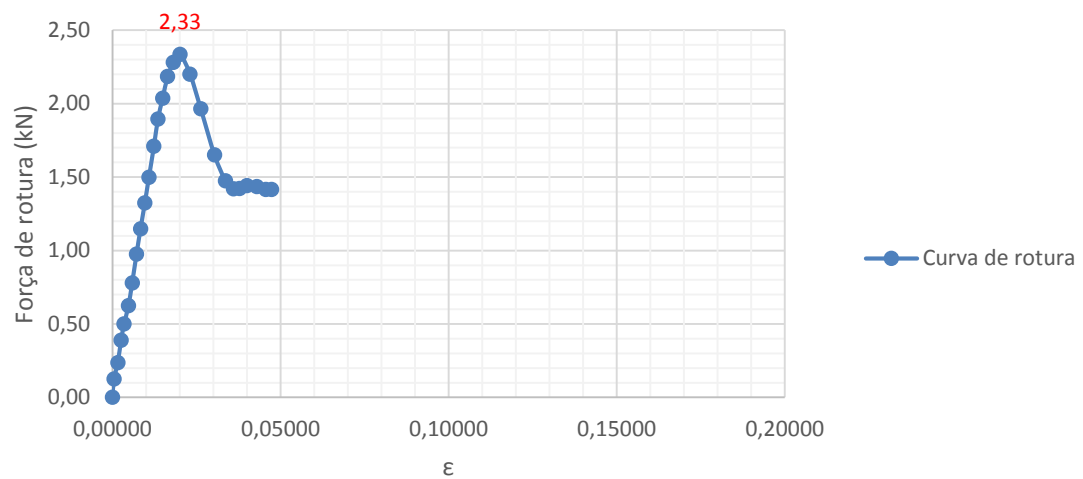


Figura Anexo C. 21-Provete nº3 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte



**Resultados da resistência ao corte: Ficha 21**

Identificação do Provete:

Provete nº 7

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,5 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):400 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,65(mm)Diâmetro:101,3(mm<sup>2</sup>)Área:8060(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo	desl.horiz.	Ângulo	leitura anel	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,0	0,00	0,000	8060,0	0	0
15	5	5,1	0,04	0,0005	8059,4	0,19	23
30	11	7,6	0,082	0,0011	8059,0	0,35	44
45	18	9,7	0,146	0,0018	8058,5	0,61	75
60	26	11,6	0,205	0,0026	8057,7	0,84	104
75	33	13,1	0,252	0,0033	8057,0	1,02	127
90	41	14,6	0,308	0,0040	8056,0	1,24	154
105	52	16,4	0,368	0,0051	8054,5	1,48	184
120	64	18,2	0,419	0,0063	8052,7	1,68	208
135	79	20,3	0,477	0,0078	8050,3	1,91	237
150	91	21,8	0,522	0,0090	8048,1	2,08	259
165	102	23,0	0,580	0,0101	8046,0	2,31	287
180	114	24,4	0,632	0,0113	8043,6	2,52	313
195	128	25,8	0,691	0,0126	8040,6	2,75	342
210	140	27,0	0,743	0,0138	8038,0	2,95	367
225	155	28,4	0,805	0,0153	8034,5	3,20	398
240	168	29,6	0,856	0,0166	8031,4	3,40	423
255	180	30,6	0,895	0,0178	8028,4	3,55	442
270	195	31,9	0,945	0,0192	8024,6	3,75	467
285	210	33,1	0,969	0,0207	8020,6	3,84	479
300	225	34,3	1,01	0,0222	8016,5	3,00	499
315	250	36,2	0,961	0,0247	8009,4	3,81	476
330	278	38,1	0,906	0,0274	8058,8	3,59	446
345	310	40,3	0,864	0,0306	8056,0	3,43	425
360	340	42,2	0,816	0,0336	8056,4	3,24	402
375	370	44,1	0,784	0,0365	8059,8	3,11	386
390	398	45,7	0,770	0,0393	8063,1	3,06	379
405	427	47,4	0,750	0,0422	8064,5	2,98	369
420	458	49,1	0,720	0,0452	8062,5	2,86	355
435	479	50,2	0,690	0,0473	8060,3	2,74	340

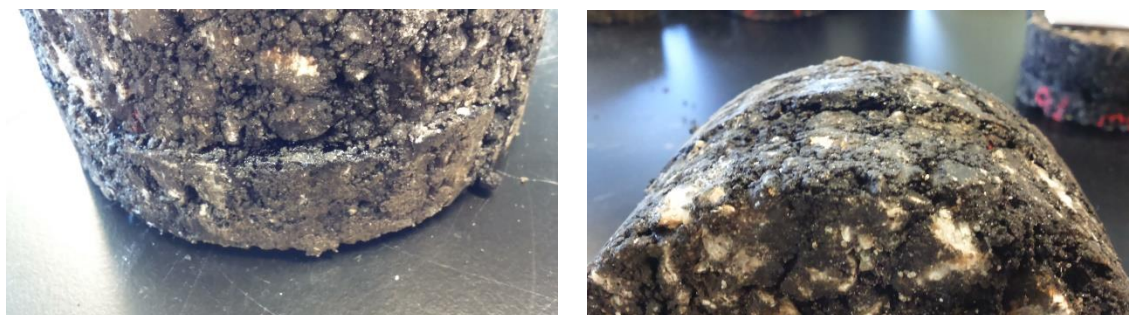
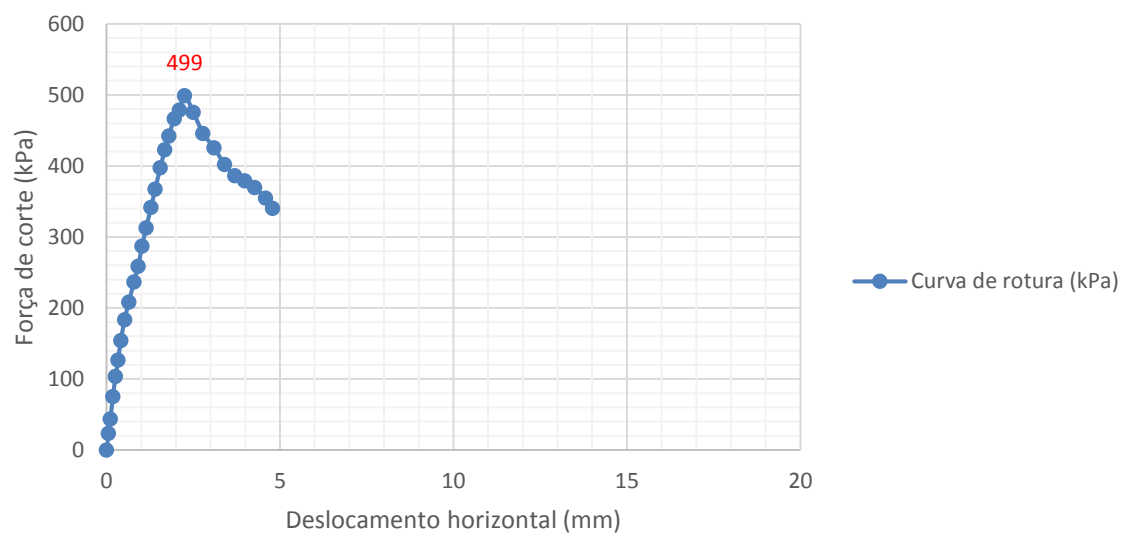
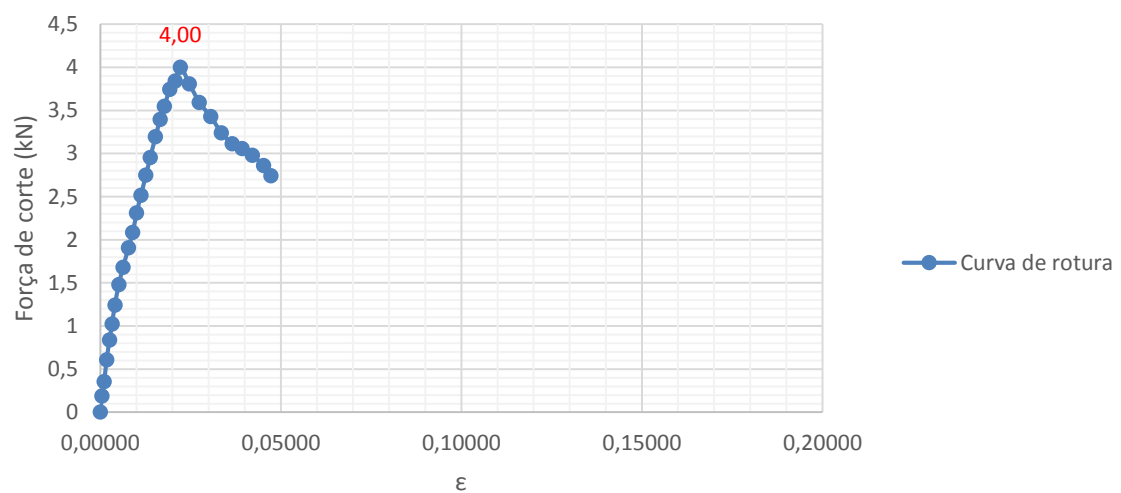


Figura Anexo C. 22-Provete nº7 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 22**

Identificação do Provete:

Provete nº 6

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,4 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):400 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,5(mm)Diâmetro:101,0(mm<sup>2</sup>)Área:8011,8(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	0,00000	8011,8	0	0
15	25	11,41	0,023	0,0025	8010,2	0,1	15
30	39	14,25	0,055	0,0039	8008,6	0,2	31
45	52	16,46	0,115	0,0051	8006,9	0,5	60
60	65	18,41	0,19	0,0064	8004,9	0,8	97
75	88	21,42	0,251	0,0087	8001,0	1,0	127
90	105	23,41	0,287	0,0104	7997,8	1,2	145
105	121	25,14	0,331	0,0120	7994,5	1,3	167
120	136	26,65	0,379	0,0135	7991,3	1,5	190
135	151	28,09	0,434	0,0150	7987,8	1,7	218
150	165	29,37	0,49	0,0163	7984,5	2,0	245
165	178	30,52	0,554	0,0176	7981,3	2,2	277
180	191	31,62	0,613	0,0189	7978,0	2,4	306
195	203	32,60	0,673	0,0201	7974,9	2,7	336
210	218	33,79	0,739	0,0216	7970,8	2,9	368
225	230	34,72	0,803	0,0228	7967,5	3,2	400
240	244	35,77	0,867	0,0242	7963,6	3,4	432
255	256	36,64	0,931	0,0253	7960,1	3,7	464
270	269	37,57	0,984	0,0266	7956,3	3,9	490
285	284	38,61	1,036	0,0281	7951,8	4,1	516
300	302	39,83	1,073	0,0299	7946,3	4,2	535
315	324	41,27	1,097	0,0321	7939,4	4,3	547
330	355	43,22	1,075	0,0351	7929,4	4,3	537
345	389	45,27	0,991	0,0385	7918,0	3,9	496
360	422	47,18	0,915	0,0418	7906,6	3,6	459
375	445	48,47	0,868	0,0441	7898,5	3,4	436
390	472	49,94	0,856	0,0467	7888,9	3,4	430
405	492	51,00	0,825	0,0487	7881,6	3,3	415

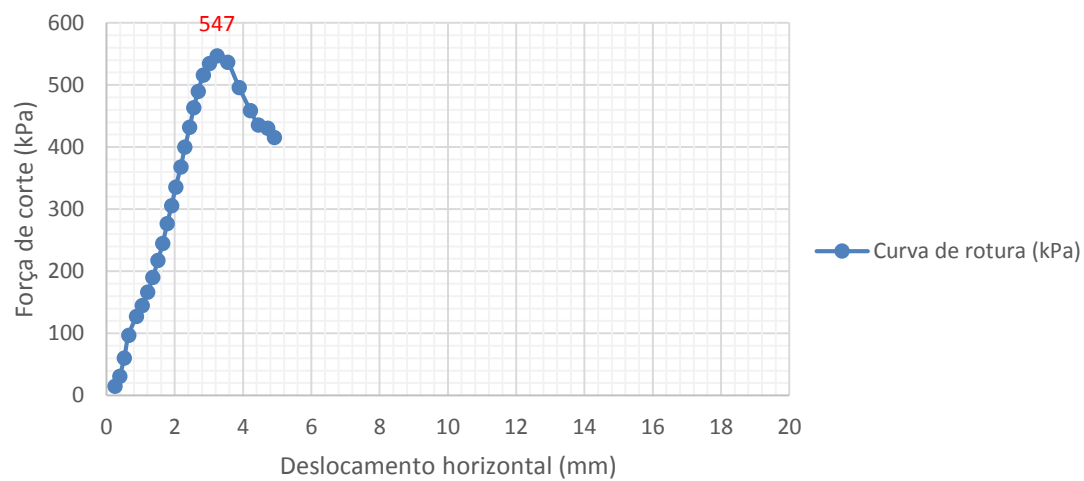
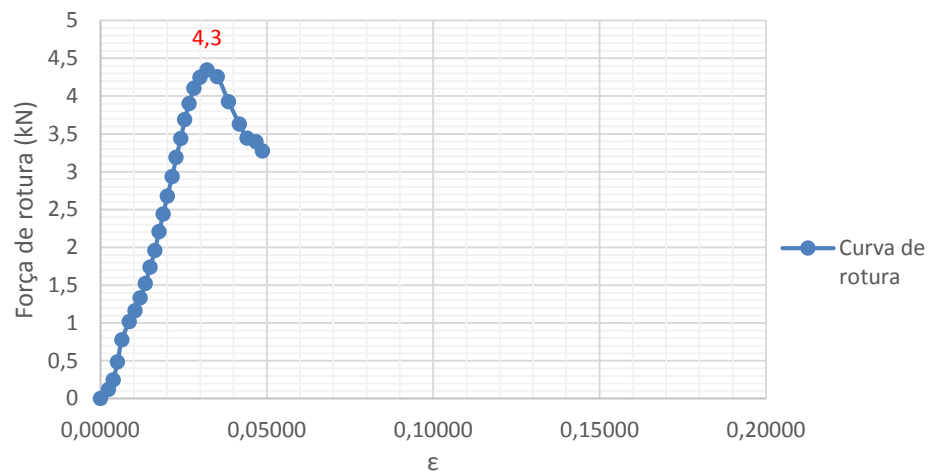


Figura Anexo C.23-Provete n°6 da amostra MB5,5% após o ensaio de corte

**Resultados da resistência ao corte: Ficha 23**

Identificação do Provete:

Provete nº 10

Identificação da Mistura:

MB5,5%Taxa de aplicação de  
emulsão betuminosa:0,3 Kg/m<sup>2</sup>Tensão Normal ( $\sigma$ ):400 kPaCaracterísticas do  
provete:Raio:50,6(mm)Diâmetro:101,3(mm<sup>2</sup>)Área:8060(mm<sup>2</sup>)

	0,01	$\alpha$	10KN	$\Delta L/L_0$	mm <sup>2</sup>	kN	kPa
Tempo (s)	desl.horiz. (div)	(Ângulo)	leitura anel (mm)	$\epsilon$	A	T	$\zeta$
0	0	0,00	0	-		-	
15	6	5,58	0,044	0,0006	8059,3	0,20	25
30	13	8,21	0,087	0,0013	8058,9	0,37	46
45	20	10,19	0,154	0,0020	8058,3	0,64	79
60	25	11,39	0,212	0,0025	8057,8	0,87	107
75	34	13,28	0,281	0,0034	8056,9	1,14	141
90	42	14,77	0,339	0,0041	8055,9	1,36	169
105	50	16,11	0,383	0,0049	8054,8	1,54	191
120	63	18,09	0,45	0,0062	8052,9	1,80	224
135	76	19,88	0,515	0,0075	8050,8	2,06	255
150	86	21,15	0,563	0,0085	8049,0	2,24	279
165	99	22,69	0,615	0,0098	8046,6	2,45	304
180	112	24,14	0,671	0,0111	8044,0	2,67	332
195	125	25,51	0,726	0,0123	8041,3	2,89	359
210	137	26,71	0,77	0,0135	8038,7	3,06	380
225	150	27,96	0,815	0,0148	8035,7	3,23	403
240	164	29,24	0,861	0,0162	8032,4	3,42	425
255	182	30,81	0,897	0,0180	8027,9	3,56	443
270	197	32,06	0,918	0,0194	8024,1	3,64	454
285	215	33,51	0,93	0,0212	8019,3	3,69	460
300	237	35,19	0,941	0,0234	8013,2	3,73	465
315	260	36,88	0,907	0,0257	8006,5	3,60	449
330	290	38,96	0,881	0,0286	7997,6	3,49	437
345	314	40,56	0,851	0,0310	7990,1	3,38	423
360	342	42,35	0,826	0,0338	7981,1	3,28	411
375	375	44,37	0,792	0,0370	7970,2	3,14	395
390	404	46,08	0,774	0,0399	7960,3	3,07	386
405	431	47,62	0,756	0,0425	7950,9	3,00	378
420	482	50,40	0,722	0,0476	7932,7	2,87	362
435	510	51,87	0,715	0,0503	7922,4	2,84	359
450	532	52,99	0,711	0,0525	7914,2	2,83	357

465	556	54,20	0,713	0,0549	7905,2	2,83	358
480	583	55,52	0,700	0,0576	7894,9	2,78	352

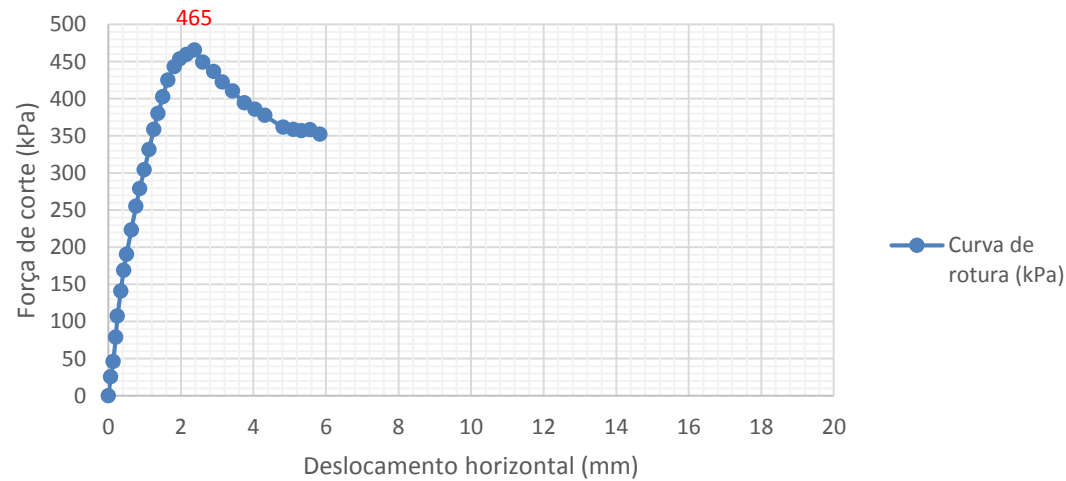
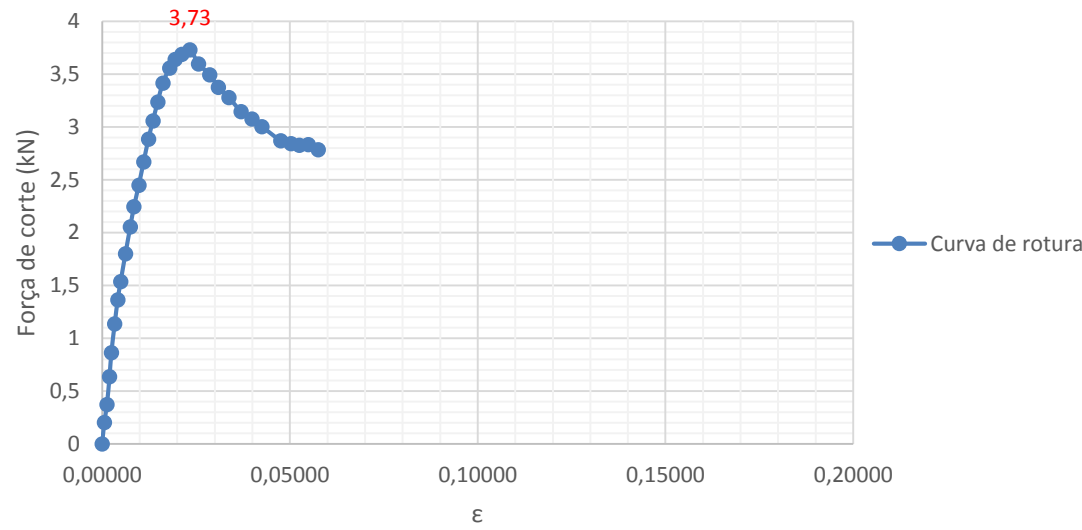


Figura Anexo C. 24-Provete nº10 da mistura MB5,5% após o ensaio de corte

